



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL DE MINAS

AGOTAMIENTO DEL MOLIBDENO EN CHILE Y POLÍTICAS PÚBLICAS PARA SU  
DESARROLLO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN MINERÍA

EMILIO GINÉS CASTILLO DINTRANS

PROFESOR GUÍA  
CHRISTIAN MOSCOSO WALLACE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN  
FERNANDO ACOSTA BARRIGA  
JOSÉ MIGUEL CRUZ GONZÁLEZ  
ENRIQUE MIRANDA SALINAS

Trabajo financiado parcialmente por CONICYT

SANTIAGO DE CHILE  
MAYO 2013

## Resumen ejecutivo

La minería chilena se ha mostrado como el eje impulsor del desarrollo económico del país, tanto a nivel industrial como permitiendo gran parte de las políticas públicas del Estado. No obstante lo anterior, el sector se ha desarrollado principalmente en el mercado del cobre, obviando por su magnitud otras riquezas minerales existentes. De aquí nace la interrogante sobre la manera en que se han utilizado recursos minerales de gran importancia nacional distintos del cobre, como por ejemplo, el molibdeno. Así, el objetivo de este trabajo radica en el estudio de la eficiencia en el uso de los recursos de molibdeno extraídos en Chile.

El trabajo realizado comprende 3 secciones principales. La primera de ellas caracteriza el mercado y la industria del molibdeno, lo que permite entregar las bases para comprender este sector. Luego se propone un modelo de optimización dinámica para la utilización de los recursos de molibdeno en base a una estrategia de inventarios que maximiza el valor de las ventas en el período evaluado. Así, se da la posibilidad de investigar sobre las herramientas de políticas públicas que permiten incrementar los niveles de bienestar social, tanto en forma de eficiencia económica como de tipo distributiva.

En términos de mercado, la producción nacional se encuentra liderada por la empresa estatal Codelco (56% de participación) y a nivel país ocupa el tercer puesto a nivel mundial con un 17% de la producción de fino.

Los resultados del modelo utilizado dan cuenta de la existencia de una posibilidad de crear mayor valor por medio de la estrategia de inventarios, manteniendo un stock intertemporal de recursos, que realizado de manera adecuada, habría aumentado el valor cerca de un 20% en el horizonte evaluado. Además, la sensibilidad realizada a éstos resultados permite sostener que ante una importante variación de los parámetros de entrada se mantiene un impacto positivo en su implementación.

Por otro lado, un punto importante de las políticas minerales se asocia a la oportunidad de disponer de un sistema de tributación especial para el molibdeno, el cual en su calidad de subproducto genera una mayor tasa de renta económica al no cargar con los costos de extracción y la gran parte de los de procesamiento. No obstante, el análisis no contiene los efectos en todo el mercado que pudieron ocurrir, en particular sobre la producción o el precio.

El trabajo da cuenta del enorme potencial chileno para generar valor en la industria del molibdeno y fomenta la importancia que tiene contar con una planificación estratégica como país hacia las distintas riquezas minerales que se tienen.

## **Abstract**

Chilean mining industry has proven to be a major force of the country's economic development, allowing an important set of public policy initiatives and leading industrial growth. Nevertheless, the industry has developed extensively in the copper market, obviating other mineral riches such as molybdenum. Considering previous statement, the objective of this work is the study of use efficiency on molybdenum extracted resources in Chile.

The study considers three main sections. First of them consist in a market and industry characterization of molybdenum, which allows to know base parameters to comprehend demand, supply and Chilean position in global production. Then a dynamic optimization model to molybdenum extracted resources is proposed. This model consists on an inventories strategy to achieve a maximum sales value on period evaluated. After analyzing different problems associated to molybdenum resources utilization, exists the possibility to study about public policy tools which permit increase social welfare, both in economic and distributive efficiency.

The paper highlights the Chilean participation in the molybdenum market, lead by state owned company Codelco (56% of national market share) and as a country occupies third place in global production with 17% of market share.

In terms of the use of molybdenum resources, the model presented accounts the existence of a possibility of creating value through a stocks strategy. Properly organized, this strategy would mean an increase of net value of nearly 20 percent on period evaluated. Furthermore, sensibility on input parameters allows maintaining a positive impact on stock strategy implementation.

Another public policy initiative mentioned shows the opportunity to have a special taxation system for molybdenum. The attributes related to its benefits in cost as a byproduct, which include not paying extraction and most of the processing costs, led molybdenum to create a higher rate of economic rent. However, the study needs to consider further work on this area, including a general equilibrium analysis to know main effects on market, particularly over global production and price.

As a remarkable conclusion, there is a high potential to create value in Chilean molybdenum industry and the study encourages the strategic planning on different mineral resources.

## **Agradecimientos**

A los profesionales de la Corporación Nacional del Cobre, con quienes tuve la oportunidad de aprender durante toda mi formación.

A la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica y al programa de becas Magíster en Chile.

Agradecer al querido Departamento de Ingeniería Civil de Minas de la Universidad de Chile, en el cual logré encontrar grandes personas y desarrollar gran parte de mi expectativa profesional. A todos quienes dan forma y vida al departamento, en especial a Juanita por su enorme dedicación.

Agradecer los miembros de la comisión, a Enrique Miranda por su visión y apoyo, al profesor José Miguel Cruz por sus valiosos aportes al estudio, al profesor Fernando Acosta por toda su dirección y comentarios en la realización de este trabajo y a lo largo de la carrera y particularmente al profesor Christian Moscoso por su guía y experiencia desde un principio en un área tan especial como lo es la Economía de Minerales.

En especial a mis amigos que hicieron de la vida en la escuela un recuerdo memorable. Gracias a todos quienes pude compartir, aprender y confiar a lo largo de distintas etapas y a todos los mineros y compañeros que me ayudaron enormemente a disfrutar mi estancia universitaria. Les deseo el mayor de los éxitos y confío en que a vida sabrá entregarles la alegría merecida.

A Tania por toda su dedicación, compañía, confianza y ánimo que logra transmitirme día a día.

A mi familia, por su sustento en las etapas más importantes de mi vida y el apoyo incondicional que sé que tengo de ustedes.

A amigos de la ciudad de héroes que han logrado ser un importante sustento en cada momento de mi desarrollo personal.

## Tabla de contenido

1. Introducción.....	1
1.1. Presentación del tema.....	1
1.2. Importancia del molibdeno en Chile .....	2
1.3. Motivación .....	3
1.4. Alcances.....	4
1.5. Objetivos .....	5
1.1.1. Objetivo general.....	5
1.1.2. Objetivos específicos.....	5
2. Antecedentes de la economía de recursos agotables .....	6
2.1. Especificidad de la Economía de Minerales.....	6
2.2. Comportamiento de los mercados de minerales .....	7
2.2.1. Demanda de minerales.....	7
2.2.2. Oferta de minerales .....	12
2.3. El problema intertemporal .....	20
2.4. Modelos de agotamiento de recursos minerales .....	22
2.4.1. El modelo básico .....	22
2.4.2. Agotamiento de reservas.....	24
2.4.3. Exploración .....	25
2.4.4. El cambio tecnológico.....	26
2.4.5. Durabilidad y reciclaje.....	27
2.5. La renta económica en la industria minera.....	27
2.6. Políticas públicas en economía de minerales .....	30
2.6.1. Antecedentes tributarios.....	31
2.6.2. Existencia de inventarios estratégicos.....	34
2.6.3. Desarrollo de políticas industriales .....	35
3. Metodología.....	37
3.1. Sección de caracterización de la industria .....	37
3.1.1. Demanda.....	38
3.1.2. Oferta.....	38

3.1.3.	Precios históricos.....	39
3.2.	Sección de modelo de agotamiento .....	39
3.2.1.	Planteamiento.....	40
3.2.2.	Calibración y resultados .....	40
3.2.3.	Análisis de sensibilidad.....	41
3.3.	Sección de estudio de políticas públicas.....	41
3.3.1.	Tributación .....	41
3.3.2.	Inventarios .....	42
3.3.3.	Política industrial.....	42
4.	Caracterización de la industria del molibdeno .....	42
4.1.	Demanda del molibdeno .....	43
4.1.1.	Propiedades y usos del molibdeno .....	43
4.1.2.	Demanda regional .....	44
4.1.3.	Demanda para usos primarios.....	45
4.1.4.	Demanda para usos finales .....	46
4.1.5.	Chile como consumidor intermedio.....	48
4.2.	Oferta del molibdeno .....	50
4.2.1.	Extracción de minerales de molibdeno .....	50
4.2.2.	Procesamiento de minerales de molibdeno.....	55
4.2.3.	Productos del molibdeno .....	57
4.2.4.	Producción de molibdeno por países.....	57
4.2.5.	Proyectos y operaciones de producción de molibdeno.....	61
4.2.6.	Producción y extracción de minerales de molibdeno en Chile.....	63
4.3.	Precios históricos .....	66
4.4.	Comentarios del capítulo.....	68
5.	Modelo de agotamiento del molibdeno en Chile .....	68
5.1.	Planteamiento del problema.....	68
5.2.	Calibración del modelo.....	72
5.2.1.	Parámetros de entrada .....	72
5.2.2.	Caso base .....	74

5.3. Resultados del modelo.....	75
5.4. Análisis de sensibilidad .....	78
5.5. Comentarios del capítulo.....	82
6. Discusión y análisis de políticas públicas para el molibdeno en Chile.....	82
6.1. Estudio de tributación para molibdeno .....	82
6.2. Implementación de inventarios.....	86
6.3. Otras alternativas de política industrial.....	88
6.4. Comentarios del capítulo.....	89
7. Conclusiones .....	90
8. Bibliografía.....	93
ANEXO A .....	99
ANEXO B .....	107
ANEXO C .....	112
ANEXO D .....	117

## Índice de tablas

Tabla 1 Porcentaje de agotamiento por fuente mineralógica. Fuente: www.IRS.gov .....	34
Tabla 2 Parámetros a definir para calibración del modelo .....	40
Tabla 3 Parámetros a definir para realización de análisis de sensibilidad .....	41
Tabla 4 Propiedades físico - químicas del molibdeno .....	43
Tabla 5 Usos primarios del molibdeno (2011) .....	45
Tabla 6 Usos primarios del molibdeno proveniente de mina .....	46
Tabla 7 Consumo final del molibdeno (2011) .....	47
Tabla 8 Participación en la producción de molibdeno por firmas (2011) .....	60
Tabla 9 Participación en la producción de molibdeno por firmas .....	61
Tabla 10 Parámetros de entrada evaluación caso base .....	74
Tabla 11 Resultados de modelo de propuesto .....	76
Tabla 12 Parámetros de entrada sujetos a sensibilidad .....	78
Tabla 13 Resultados análisis de sensibilidad para los distintos parámetros .....	78
Tabla 14 Sensibilidad ante capacidad máxima por período en función de producción mundial.....	81
Tabla 15 Captura de renta económica en la extracción del molibdeno .....	85
Tabla 16 Captura de renta económica en la extracción de molibdeno sin producción de Codelco .....	85
Tabla 17 Resultados de modelo modificado de agotamiento de molibdeno .....	87
Tabla 18 Inventarios nacionales para modelo modificado.....	87



## Índice de figuras

Figura 1 PIB por sector económico 2011. Fuente: Banco Central de Chile (BCCh).....	2
Figura 2 Intensidad de uso de acero. Fuente: Global Insight & Rio Tinto 2013. ....	9
Figura 3 Elasticidad cruzada de la demanda para el oro. Fuente: Mineral Demand - Theory in practice. P. Howie (2006). ....	10
Figura 4 Elasticidad precio de la demanda en distintos horizontes temporales. Fuente: Mineral Demand - Theory in practice. P. Howie (2006).....	12
Figura 5 Costos de transporte y valor de commodities minerales. Fuente: Trade in minerals. P. Maxwell (2006). ....	14
Figura 6 Curva de oferta de metales en distintos horizontes temporales. Fuente: Mineral supply - Exploration, production, processing and recycling. P. Maxwell (2006). ....	16
Figura 7 Curva de ofertas para subproductos. Fuente: Mineral supply - Exploration, production, processing and recycling. P. Maxwell (2006).....	17
Figura 8 Curva de oferta de chatarra nueva. Fuente: Mineral supply - Exploration, production, processing and recycling. P. Maxwell (2006).....	19
Figura 9 Representación de renta económica. Fuente: Apuntes Economía Minera. OAraneda (2011).....	28
Figura 10 Renta económica en minería. Fuente: Mineral taxation and royalties. F. Harman and P. Maxwell (2006).....	30
Figura 11 Esquema de trabajo propuesto para validar utilización de molibdeno en el país. ....	37
Figura 12 Esquema de trabajo para caracterizar el mercado del molibdeno. ....	38
Figura 13 Proceso de trabajo para sección de modelo de agotamiento.....	39
Figura 14 Consumo final de molibdeno (2011). Elaboración propia en base a información de Steel and Market Research (2011). ....	44
Figura 15 Consumo regional de molibdeno de mina. Fuente: Steel and Market Research (2011).....	44
Figura 16 Distribución del consumo de molibdeno a nivel regional. Fuente: Steel and Market Research (2011).....	45
Figura 17 Consumo final de molibdeno (2011). Fuente: Steel and Market Research (2011).....	47
Figura 18 Importaciones chilenas de productos de molibdeno. Fuente: Servicio Nacional de Aduanas (2012).....	48

Figura 19 Participación de empresa Molymet S.A. en importaciones. Fuente: Servicio Nacional de Aduanas (2012).....	49
Figura 20 Origen de importaciones de productos de molibdeno. Fuente: Servicio Nacional de Aduanas (2012).....	49
Figura 21 Extracción de molibdeno de mina global (2011). Elaboración propia en base a información de Raw Materials Database (2012).....	50
Figura 22 Producción de mina por fuente mineral a nivel global. Elaboración propia en base a información de Raw Materials Database (2012).....	51
Figura 23 Oferta mundial de molibdeno como subproducto y precio. Elaboración propia en base a información de Raw Materials Database (2012).....	52
Figura 24 Elasticidad corto plazo precio oferta del molibdeno como subproducto. Elaboración propia en base a información de Raw Materials Database (2012). .....	53
Figura 25 Producción global de molibdeno como subproducto (línea azul) y precio del molibdeno (línea roja). Elaboración propia en base a información de Raw Materials Database (2012).....	53
Figura 26 Producción global de molibdeno como subproducto (línea azul) y precio del cobre (línea roja). Elaboración propia en base a información de Raw Materials Database (2012).....	54
Figura 27 Elasticidad cruzada oferta molibdeno y precio del cobre. Elaboración propia en base a información de Raw Materials Database (2012).....	55
Figura 28 Etapas productivas de minerales de molibdeno. Fuente: “Molibdeno” Sutulov, Alexander. ....	56
Figura 29 Producción mundial de molibdeno. Elaboración propia en base a información de Raw Materials Database (2012). .....	58
Figura 30 Distribución geográfica de extracción de molibdeno para el año 2011. Elaboración propia en base a información de Raw Materials Database (2012). .....	59
Figura 31 Evolución de la concentración de la industria por países. Elaboración propia en base a información de Raw Materials Database (2012).....	59
Figura 32 Evolución de la concentración de la industria por firmas. Elaboración propia en base a información de Raw Materials Database (2012).....	60
Figura 33 Principales proyectos que contemplan la producción de molibdeno según su metal principal. Fuente: Raw Materials Database (2012).....	62
Figura 34 Principales proyectos de producción de molibdeno según etapa del proyecto. Fuente: Raw Materials Database (2012).....	62

Figura 35 Proyectos de molibdeno según producto principal y producción relativa. Fuente: Raw Materials Database (2012).....	63
Figura 36 Productores de molibdeno en Chile por mina. Elaboración propia en base a información de Raw Materials Database (2012).....	64
Figura 37 Participación de principales compañías productoras en Chile. Elaboración propia en base a información de Raw Materials Database (2012).....	64
Figura 38 Exportaciones de chilenas de productos de molibdeno. Fuente: Servicio Nacional de Aduanas (2012).....	65
Figura 39 Exportaciones chilenas de productos de molibdeno por productor. Fuente: Servicio Nacional de Aduanas (2012). ....	65
Figura 40 Destino de exportaciones chilenas de molibdeno. Fuente: Servicio Nacional de Aduanas (2012).....	66
Figura 41 Historia de precios nominales de concentrado de molibdeno (1930 - 1983). Fuente: Vicepresidencia comercialización Codelco (2012) .....	67
Figura 42 Precios nominales de concentrado de molibdeno (1984 - 2011). Fuente: Vicepresidencia comercialización Codelco (2012) .....	67
Figura 43 Variación anual de producción de molibdeno chilena y variación anual del precio. Elaboración propia.....	69
Figura 44 Extracción de molibdeno en Chile y precio de concentrado de molibdenita nominal. Elaboración propia en base a información de Raw Materials Database (2012). ....	73
Figura 45 Forma curva de costos medios de inventario teórica para el caso propuesto. ....	74
Figura 46 Flujos descontados para caso base modelo. ....	75
Figura 47 Flujos descontados según resultado de modelo. Elaboración propia en base a resultados de modelo propuesto. ....	76
Figura 48 Inventarios nacionales de molibdeno según resultado de modelo. Elaboración propia en base a resultados de modelo propuesto.....	77
Figura 49 Utilización óptima de y precio de molibdeno. Elaboración propia en base a resultados de modelo propuesto. ....	77
Figura 50 Sensibilidad sobre el aporte de valor de la estrategia de inventarios a partir de distintos parámetros. Elaboración propia en base a resultados de modelo propuesto...	79
Figura 51 Sensibilidad sobre el aporte de valor de la estrategia de inventarios para variables menos sensibles. Elaboración propia en base a resultados de modelo propuesto. ....	79

Figura 52 Inventarios de molibdeno sin restricción de capacidad. Elaboración propia en base a resultados de modelo propuesto. ....	80
Figura 53 Inventarios de molibdeno según restricciones de capacidad en función de producción mundial. Elaboración propia en base a resultados de modelo propuesto....	81

# 1. Introducción

## 1.1. Presentación del tema

La extracción de los recursos naturales es una realidad que se repite en los más importantes rubros económicos de Chile. Ya sea desde sus recursos forestales, agrícolas, pesqueros o minerales, el país ha mostrado un marcado desarrollo en la producción y exportación de materias primas o commodities. En este contexto, la explotación de recursos minerales ha sido, es y seguirá presentándose entre las mayores fuentes de riquezas para Chile. El país se ha destacado a nivel mundial como productor de cobre, siendo dominante en ello, pero, de alguna manera, dejando en un segundo plano el desarrollo de otras fuentes de riquezas minerales que se encuentran a lo largo del país, como por ejemplo metales como el molibdeno y el renio.

Dentro de los principales ejes que dominan el desarrollo de una economía en base a recursos naturales se debe destacar la planificación y extracción de las riquezas no renovables. Realidades como la ubicación de recursos en distintos períodos de tiempo, incertidumbre de varias variables (ya sea en tiempo o espacio), intereses y preferencias de generaciones futuras y la búsqueda de un desarrollo sustentable corresponden a algunos de los temas que deben considerarse a la hora de tomar decisiones en el presente, a modo de llegar a la manera más eficiente en el uso de los recursos disponibles.

Otro aspecto interesante es la situación del país frente a la poca diversidad de exportaciones y baja industrialización de las mismas, siendo destacadas por el académico de la Universidad de Harvard Michael Porter:

*“En su exposición, organizada por la Universidad del Desarrollo (...) planteó que la economía nacional sólo se ha quedado en la exportación de commodities, —lo que para Porter es “deprimente”— sin avanzar en la elaboración de productos con valor agregado o en la generación de servicios, elementos básicos, según el experto, para lograr un mayor avance económico. El académico dijo que los actuales niveles de crecimiento de entre un 4 y 5%, con los actuales precios récord del cobre, más que un avance, significan un retroceso para nuestra economía.”* Jueves, 29 de mayo de 2008. Economía y Negocios Online.

Frente a esta situación, se plantea el hecho como país de si es necesario avanzar en la elaboración de políticas de crecimiento para otros minerales (diversificando) y a su vez, de qué manera enfocar el esfuerzo público para generar estos avances.

De este modo y persiguiendo avanzar en el desarrollo de la diversificación en el uso de los recursos minerales, se presenta este trabajo en cuanto al estudio del molibdeno en Chile, con sus características a lo largo del tiempo y posibilidades estratégicas futuras.

### 1.2. Importancia del molibdeno en Chile

La riqueza natural de Chile corresponde a la fuente más importante de crecimiento económico del país, con una economía abierta basada en las exportaciones, siendo la minería un área determinante del robusto crecimiento económico que ha demostrado el país durante su historia, con un porcentaje cercano al 15% del PIB en promedio de los últimos 8 años<sup>1</sup>. El año 2011 cerca de un 60% de las exportaciones correspondió a la industria minera (considerando los productos de las plantas de procesamiento, fundiciones y refinerías), números más que suficientes para catalogar al país como una economía basada en los recursos minerales:

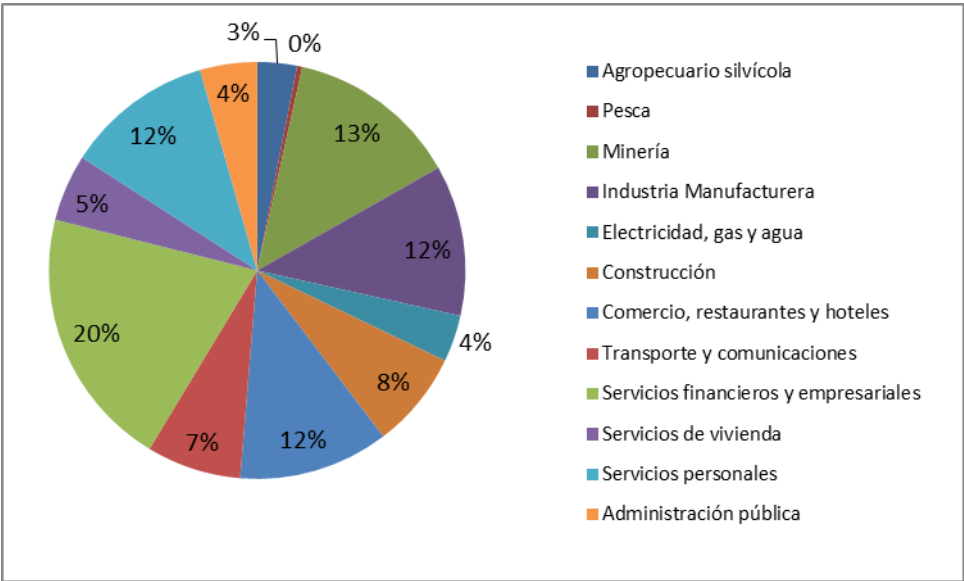


Figura 1 PIB por sector económico 2011. Fuente: Banco Central de Chile (BCCh).

Si bien la dependencia económica hacia los recursos minerales ha sido constante en los años de existencia del país, desde un comienzo con la producción de salitre junto a otros nitratos y actualmente con el cobre, la industria se caracteriza por enfocarse minoritariamente a otras sustancias minerales, de las cuáles el país presente importantes recursos y reservas, destacando entre ellas el molibdeno.

<sup>1</sup> Fuente: Cochilco, en base a datos del Banco Central de Chile.

Así, el análisis de la industria del molibdeno se presenta como una importante herramienta a utilizar para entender y encauzar la industria y los nuevos negocios potenciales que se pueden generar a partir de la riqueza de este mineral en Chile.

La industria del molibdeno a nivel mundial se caracteriza por ser un mercado que durante el 2010 alcanzó un tamaño levemente superior a las 240 miles de toneladas métricas, que correspondió a un valor cercano a los 8.300 millones de US\$.

En términos históricos, la industria del molibdeno ha presentado un crecimiento cercano al 4%, pasando a un aumento promedio del 6% para los últimos 5 años, crecimiento que vienen impulsado por el crecimiento de economías en desarrollo, destacando el aumento del consumo de acero de China, India y Brasil.

La importancia relativa de Chile dentro de la industria del molibdeno es amplia: durante el 2010 el país tomó el tercer lugar a nivel mundial y a su vez se ha mostrado como un importante exportador, debido a que los otros mayores productores (China y Estados Unidos) consumen gran parte de su producción en las industrias locales<sup>2</sup>. En términos económicos, la industria correspondió a un 4% de las exportaciones mineras, con cerca de 1.630 millones de US\$, lo cual equivale a un 68% de las exportaciones de celulosa y es equivalente al flujo de capital generado por la industria del vino y la industria forestal.

A su vez, la búsqueda sobre la producción óptima de recursos agotables ha sido un tema de marcada relevancia en países con economías basadas en este tipo de recursos, donde la preocupación sobre la manera de generar un desarrollo sustentable al considerar el agotamiento de minerales ha permitido encauzar distintas decisiones en políticas públicas y conocer la verdadera generación de valor del país.

### **1.3. Motivación**

Durante la historia, Chile se ha caracterizado por su crecimiento en base a la producción de recursos naturales, ya sean de tipo renovable o no. En este ámbito, la minería en Chile corresponde a la principal actividad económica, junto con la mayor fuente de ingresos fiscales. Así, todo tema concerniente al desarrollo de la minería en cada una de sus aristas debería ser tratado como una política activa de promoción del área y no tan sólo recordar al sector en épocas de bonanza o utilizarlo en estrategias basadas en el aprovechamiento de una “vaca lechera” que vulnera la capacidad de un desarrollo sustentable.

---

<sup>2</sup> Fuente: Cochilco, mercado internacional del molibdeno y la producción en Chile 2010.

En concreto, muchas veces se deja de lado el potencial que existe en otros minerales. Por esto, nace el interés en lograr una diversificación de la estructura nacional minera, prácticamente mono-dependiente, lo cual genera incertidumbre en el riesgo económico del país y en la competitividad en otras actividades industriales.

El trabajo sobre el molibdeno genera otro interés tanto o más relevante, que nace de su característica principal en la industria minera nacional, la cual es ser generado como un subproducto de otro mineral, el cobre. Esta característica hace que la producción de molibdeno en el país dependa de mayor manera del precio del cobre que del mismo precio del molibdeno, lo que a priori genera el cuestionamiento sobre la eficiencia en que se extrae el recurso, dado que la producción no es definida por su propio sistema de precios. Así, los supuestos de la economía de mercado sobre la asignación óptima de los recursos podrían dejar de cumplirse para este caso claramente especial en nuestro país.

De esta manera, el presente trabajo sobre la producción del molibdeno en Chile y sus alternativas de manejo público, pretende aportar a una interrogante que sigue activa en los núcleos de discusión académica y que se ha acentuado actualmente por las duras consecuencias de la crisis económica mundial y que tiene relación sobre la organización de los mercados, la eficiencia en la utilización de los recursos naturales agotables y el rol que debe tener el Estado sobre la conducción de la industrialización en un país.

#### **1.4. Alcances**

El trabajo a desarrollar contempla una revisión de los principales autores sobre modelos de agotamiento de recursos minerales, junto con la especificidad de la economía de minerales, a modo de sentar las bases teóricas del estudio. Se destaca el concepto de minerales agotables, en el cual se enmarca la corriente teórica en la cual se está generando este aporte.

El estudio y caracterización del mercado del molibdeno se vuelve una herramienta para comprender las variables más importantes y los agentes relevantes que se desenvuelven en este entorno. Si bien el estudio contempla análisis de oferta y demanda a nivel mundial, no se presentan datos sobre proyecciones del mercado ni sobre los precios. Dado el enfoque hacia Chile, la mayor parte del detalle del análisis se centra en destacar la posición del país dentro del comercio internacional.

Otra característica relevante constituye el hecho de que el trabajo se sustenta en el uso de modelos clásicos de agotamiento, con variantes que se acoplen de manera más cercana a la extracción del molibdeno en Chile, como por ejemplo el hecho de ser un subproducto del cobre. Si bien se menciona la existencia del Renio como subproducto



del molibdeno, no se incluye la valorización del mismo en el modelamiento. Además, el modelo se sustenta en el uso de datos históricos y no involucra cambios e interacción para las variables exógenas, es decir, se trata de un modelamiento *ceteris paribus*.

Por último, el estudio sobre las posibles alternativas que se pueden adoptar por parte de las autoridades en la industria del molibdeno, se enfoca hacia las mejoras en términos de eficiencia y distribución, en donde el área las políticas industriales pueden permitir un desarrollo beneficioso en términos sociales.

## **1.5. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo general**

Este trabajo tiene por objetivo estudiar la eficiencia económica en la utilización del molibdeno extraído, utilizando las herramientas y modelos económicos propios de los recursos naturales agotables, a modo de entregar directrices acerca de las políticas que podrían implementarse en esta industria extractiva. La base que sustenta este objetivo se traduce en el hecho de que por ser el molibdeno un sub – producto del cobre, la producción nacional no refleja adecuadamente el costo de oportunidad del mineral, por lo cual se podrían obtener mayores niveles de eficiencia en la utilización del recurso.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

Dentro de los objetivos específicos que permiten desarrollar lo señalado en el punto anterior se presentan:

- Realizar un análisis sobre los elementos característicos de la Economía de Minerales y de los distintos modelos sobre el agotamiento de los recursos naturales.
- Contextualizar y caracterizar la industria y el mercado del molibdeno, tanto a nivel nacional como internacional.
- Estudiar indicios de problemas de utilización de recursos asociados a la extracción del molibdeno a través de los años en Chile.
- Proponer una herramienta que permita verificar problemas de eficiencia económica para el molibdeno.
- Investigar sobre los instrumentos tributarios disponibles para los recursos minerales.
- Explicar la importancia que tiene, en el proceso de crecimiento y diversificación de un país, la aplicación de políticas mineras.

## **2. Antecedentes de la economía de recursos agotables**

El presente capítulo muestra las características de los minerales que permiten hablar de una nueva disciplina dentro del área económica. La base microeconómica necesaria para comprender la mayor parte de los conceptos se entrega en el ANEXO A.

### **2.1. Especificidad de la Economía de Minerales**

La Economía de Minerales es una sub – disciplina que se enmarca en el área de la Economía de Recursos Naturales, área que se individualiza como un sector relevante en la economía debido a sus características únicas que la alejan de la racionalidad económica convencional. De manera general, la Economía de Minerales corresponde a la aplicación de la economía en el estudio de todos los aspectos relacionados al sector minero (Maxwell 2006).

Según los autores de teoría clásica de liberalismo económico, existen una serie de supuestos que permiten que los mercados asignen y utilicen de manera eficiente los recursos de los cuales se dispone, condensando toda esta información a través del sistema de precios. Algunos de estos supuestos pueden sintetizarse como sigue (Engel 1990):

- Los agentes económicos son tomadores de precios, es decir, su actuar no influye en el precio transado en el mercado.
- Todos los bienes producidos son homogéneos lo que significa que no hay diferenciación de productos y las firmas tienen acceso a la misma tecnología.
- No existen costos de transacción entre compradores y vendedores.
- No hay barreras de entrada o salida para los agentes en el mercado.
- Tanto productores como consumidores realizan sus decisiones de manera racional, es decir, maximizando sus beneficios individuales.

En contraste a lo que se intenta idealizar mediante los modelos de competencia perfecta, los recursos naturales presentan características propias que se alejan de gran parte de los supuestos anteriores. La mayor parte de esta diferenciación es provocada por la existencia de distintas fallas de mercado, que se expresan como: conflictos sobre los derechos de propiedad, recursos de propiedad común, externalidades que crean diferencias substanciales entre costos privados y sociales, restricciones a la disponibilidad del recurso, rentas económicas se mantienen en el tiempo, preocupación sobre la distribución de las ganancias y sobre los intereses de las generaciones futuras.

La economía de minerales, caracterizados como recursos naturales agotables o no renovables por distintos autores (Tilton 2002), se presenta como una disciplina académica que promueve el desarrollo y educación sobre temas económicos y de

políticas públicas asociados con los descubrimientos, extracción, procesamiento, uso, reciclaje y descarte de los commodities minerales (Gordon y Tilton 2007).

Gran parte del esfuerzo realizado por los principales autores se ha enfocado en un tema que se une parcialmente al área de la planificación minera, el cual corresponde a la utilización óptima de los recursos existentes desde la perspectiva del bienestar; considerando el efecto intertemporal en la utilización de un recurso cuyo stock va disminuyendo a través del tiempo. A su vez, estos trabajos van de la mano con la búsqueda del mayor beneficio para la sociedad en su conjunto y las herramientas públicas disponibles para corregir, si es necesario, las fallas que pueden existir en el funcionamiento del mercado.

## **2.2. Comportamiento de los mercados de minerales**

Entre los commodities minerales se distinguen generalmente 3 grupos, agrupados como metales, no metales y energéticos. En particular, el enfoque hacia los metales permite distinguir varios productos, que se vuelven relevantes para la economía mundial por sus características físicas y químicas, lo que los hace, de alguna manera, únicos.

En la realización de un correcto estudio sobre el comportamiento de los mercados asociados a este tipo de productos se hace necesario un correcto análisis tanto de las fuerzas de la demanda como de la oferta de un determinado metal.

### **2.2.1. Demanda de minerales**

#### **Demanda derivada**

Una de las principales características de los minerales es que rara vez se presentan como productos finales (exceptuando por supuesto el caso del oro y otros metales preciosos). Esto sucede debido a que los minerales se requieren por sus atributos o características, que son necesarias en algún proceso de manufactura para un consumidor final. Así, los minerales responden a un concepto llamado demanda derivada, en donde la demanda proviene realmente por un conjunto de atributos más que por un mineral en específico, es decir, que un material puede reemplazar a otro siempre que cumpla con los requerimientos del uso que el proceso les está dando.

El concepto de demanda derivada proviene del hecho de que los minerales son factores de producción utilizados por las firmas. Una definición formal de la condición de demanda derivada es que la demanda por cualquier factor productivo finalmente depende, o deriva desde, la demanda por el o los productos finales para los cuales el factor es utilizado (Campbell 1985).

Tal como en cualquier producto, la demanda de los minerales se sustenta en sus atributos. Lo anterior indica que los productores no dudarán en utilizar otro producto que realice el mismo trabajo de mejor manera. De este modo, la demanda derivada por un determinado factor de producción se vuelve altamente dependiente de la tecnología existente y de la disponibilidad de otros factores que compitan en la función de producción de cada firma, además de los factores asociados a la demanda por el bien final.

Según lo explicado en el punto sobre la teoría de la firma, el óptimo de la combinación de factores para un nivel de producción dado, se alcanza cuando el precio por la productividad marginal del factor se iguala a su costo marginal. Este antecedente marca la base para determinar el precio al cual se demanda aquel determinado factor:

$$P_{\text{mineral}} = P_{\text{bien final}} \cdot PMg_{\text{mineral}}$$

Otra de las diferencias con respecto a la demanda por bienes finales viene dada por la forma en que se genera la demanda agregada, la cual se determinaba sumando horizontalmente las demandas individuales. No obstante, para el caso de los minerales, es necesario que el precio del bien final se mantenga constante para que la suma horizontal sea apropiada. Por el contrario, si el precio del mineral cae, el precio del producto final, considerando un mercado competitivo, también cae (y viceversa). El resultado es un amplio cambio en la cantidad demanda por el producto final. De esta manera, el hecho de considerar este efecto para cada productor hará que su demanda derivada posea una pendiente mayor.

### **Factores determinantes de la demanda de minerales**

Dada la gran cantidad de determinantes que pueden afectar la demanda de los minerales, es necesario fijar cuáles serán los factores más relevantes, agregando a ello el horizonte de tiempo bajo el cual se trabajará. La razón de esto, proviene de los cambios tecnológicos, los cuales pueden no ser realmente significativos en el corto plazo, pero deben ser tomados necesariamente en cuenta al momento de realizar estudios en un horizonte de tiempo mayor.

Alguno de los factores más relevante a tener en cuenta en los estudios de la demanda de los minerales corresponden a: ingreso, precio del propio mineral, precio de complementos y sustitutos, cambios tecnológicos y actividades gubernamentales (Tilton, The Metals 1984).

En primer lugar, el ingreso afecta la manera en que se demandan los productos finales (ver restricción presupuestaria), lo que trae cambios en la demanda por factores

productivos. La variable más relevante a la hora de analizar la demanda de minerales corresponde a la variación frente al PIB o la producción industrial de cada país. En términos formales, esta variación se denomina elasticidad ingreso de la demanda e involucra la intensidad de uso con el PIB per cápita; la cual se caracteriza por ser más elástica (valores mayores a uno) en países en desarrollo (que comienzan un proceso de industrialización) e inelástica para países desarrollados con un consumo estable de minerales. La siguiente figura muestra la evolución de la intensidad de uso de acero para distintos países, lo cual relaciona el consumo del metal con el nivel de desarrollo económico:

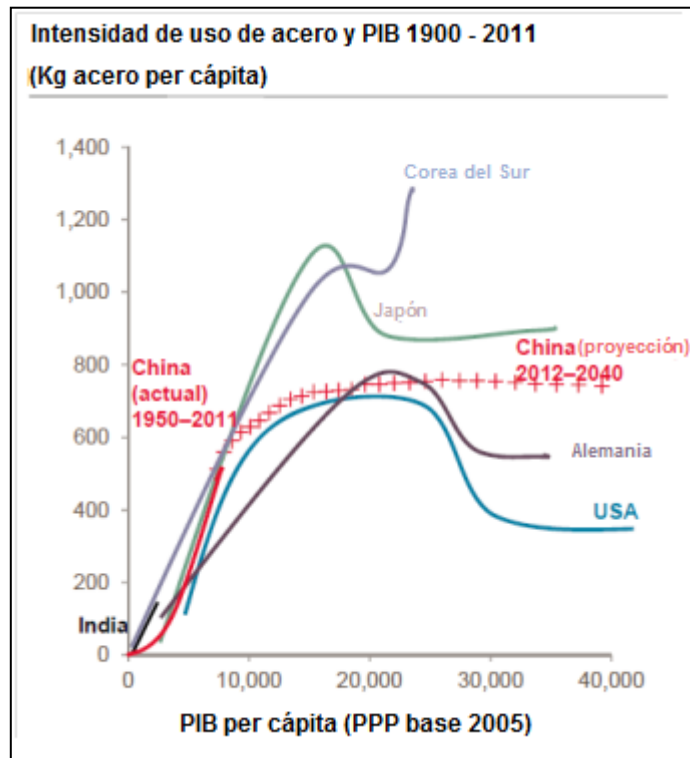


Figura 2 Intensidad de uso de acero. Fuente: Global Insight & Rio Tinto 2013.

Entre los cambios que se puedan generar en la demanda deben distinguirse aquellos de corto plazo, por cambios en los ciclos de negocios, de aquellos que indican un crecimiento constante y un cambio estructural en la economía, como por ejemplo la política de desarrollo china desde inicios del siglo XXI.

Otro factor relevante corresponde al precio del propio mineral. Tal como se observó en los antecedentes microeconómicos, un mayor precio de un bien se traduce en un menor consumo del mismo. Para el caso de los minerales este efecto se da de manera doble (en el caso del “equilibrio estático” o *ceteris paribus*), por un lado un aumento del precio del mineral se traducirá en un mayor precio del bien final, lo que reducirá la cantidad

que pueden comprar dados sus ingresos (efecto ingreso) y podrían cambiar a otros bienes que no hayan aumentado de precio (efecto sustitución). El segundo efecto tiene que ver con la posibilidad de sustitución del mineral entre los factores de producción de la industria donde está siendo utilizado. Este efecto suele ser más relevante que aquel que ocurre por los consumidores finales, no obstante, la sustitución efectuada por el productor requiere tiempo, equipos, capacitación y tecnología, por lo cual se necesitarían un importante número de años para notar el efecto de la sustitución de factores en una industria ante alzas del precio de un mineral.

Relacionado al factor anterior, la demanda de un mineral puede verse afectada por precios de otros productos. Los minerales compiten con distintos materiales en los mercados de uso final, por lo tanto una baja en el precio de un mineral sustituto alterará negativamente la demanda para el resto de los otros minerales. De manera análoga, puede darse que una caída de precio de un mineral aumente la demanda de otro, por lo cual puede tratarse de productos complementarios (tal es el caso los metales utilizados en la fabricación de acero y derivados). Así, los cambios que ocurren por productos sustitutos o complementarios se dan a nivel del proceso manufacturero, es decir, dependerán de la tasa de sustitución tecnológica característica de la industria o firma. La herramienta relevante para este factor corresponde a la elasticidad cruzada de la demanda, la cual toma valores positivos para bienes sustitutos y valores negativos para bienes complementarios, tal como se presenta en la siguiente figura:

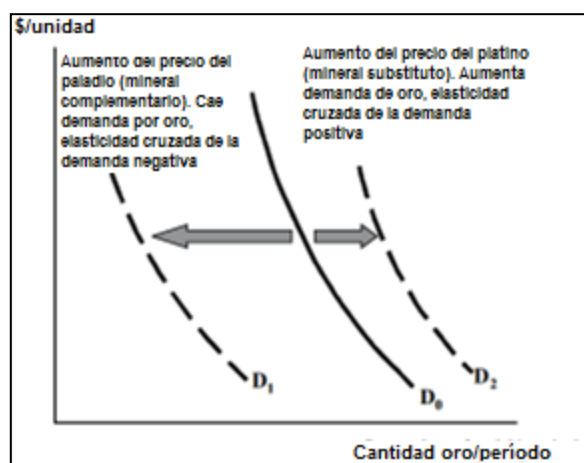


Figura 3 Elasticidad cruzada de la demanda para el oro. Fuente: Mineral Demand - Theory in practice. P. Howie (2006).

El cambio tecnológico corresponde a un factor que puede afectar la demanda de muchas maneras. Por un lado, una nueva tecnología podría reducir la cantidad del mineral requerido en un proceso productivo y por otro puede afectar la habilidad de un mineral para competir en un determinado mercado de uso final (tal como se dio en el

caso de las tuberías de PVC, en desmedro del cobre). Además, la tecnología puede cambiar el número y tamaño de mercados terminales, como por ejemplo el papel del litio en el mercado de los autos eléctricos. La medición del cambio tecnológico puede llevar bastantes dificultades. Sin embargo, al analizar demanda sobre un horizonte corto de tiempo, éste puede no tomarse en cuenta, debido al tiempo que requiere la introducción y propagación de una nueva tecnología.

Un factor que incide de manera derivada corresponde a las preferencias de los consumidores en los mercados finales, pues un cambio en la conducta o gustos alterará el tipo de minerales que se utilizarán. La información demográfica, como la distribución etaria, influye notablemente en el consumo de bienes durables donde se utilizan los minerales. Otros factores que pueden alterar las preferencias de los consumidores corresponden a su ingreso per cápita, distribución del ingreso y la calidad del producto a una tecnología dada. Aun cuando los mecanismos anteriores se mantengan constantes, las preferencias pueden variar en base a gustos personales, influenciados por temas publicitarios y otras consideraciones ligadas al comportamiento de las empresas.

Finalmente, las actividades gubernamentales logran afectar la demanda por medio de las políticas y regulaciones, que pueden verse en el caso extremo de las guerras, cuando la producción se basa en manufactura intensa en uso de metales. En casos menos extremos, la distribución de los gastos de gobierno conlleva variaciones en la demanda de minerales. Por ejemplo, un aumento en los gastos de construcción significará mayor demanda por minerales, mientras que mayor gasto en educación o investigación no requieren de la misma cantidad de minerales. Otra manera que los gobiernos pueden afectar la demanda proviene de la restricción sobre uso de materiales o restricciones sobre importaciones/exportaciones que significa limitaciones sobre los minerales que pueden utilizar las firmas, o también como en el caso del oro mediante la acumulación de las reservas existentes en los bancos centrales.

Los factores antes mencionados permiten trabajar o conocer de manera teórica la forma en que debería comportarse la curva de demanda de los minerales en virtud del horizonte temporal considerado. Así, también puede darse que un mineral posea varias curvas de demanda dependiendo del nivel agregado que se analice (país, región o mundial).

El horizonte temporal seleccionado para la curva de demanda en los minerales debe ser un factor relevante al momento de realizar cualquier análisis de mercado. Generalmente, se distinguen 4 sub períodos de estudio, denominados inmediato, corto, largo y muy largo plazo.

En primer lugar, el plazo inmediato corresponde a un horizonte tan pequeño que difícilmente las firmas pueden aumentar su producción, lo cual limita la demanda hasta la cantidad de inventarios disponibles. Luego, en el corto plazo el factor limitante proviene de la máxima utilización de los equipos e instalaciones disponibles, mientras que en el largo plazo se permite el desarrollo de proyectos nuevos o expansiones, es decir, permite cambios en los factores productivos que se encontraban fijos en el corto plazo. Por último, en el muy largo plazo en teoría no existen limitantes, pues podrían ocurrir descubrimientos de nuevos yacimientos o nuevas tecnologías. En términos prácticos, estas limitantes le otorgan las siguientes formas a la curva de demanda según el período seleccionado:

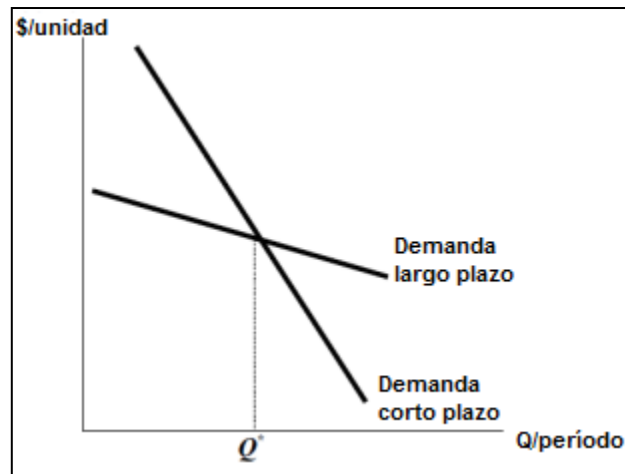


Figura 4 Elasticidad precio de la demanda en distintos horizontes temporales. Fuente: Mineral Demand - Theory in practice. P. Howie (2006).

De esta manera, se aprecia que la elasticidad precio de la demanda varía desde ser bastante inelástica en el corto plazo hasta más elástica a medida que se liberan las restricciones físicas.

Finalmente, una característica importante en la demanda de minerales, es que la destrucción de la demanda por efecto del precio o nuevas tecnologías puede hacer que esta no sea reversible, esto significa, que la pérdida de un determinado mercado será de forma permanente.

### 2.2.2. Oferta de minerales

Los minerales provienen del proceso de extracción desde la corteza terrestre, pero esta extracción (y posterior procesamiento) no siempre se caracteriza por contener sólo un material de importancia económica. Esta situación conlleva un análisis distinto para la oferta de minerales que se presentan como el producto principal, sub producto o co producto en una explotación. Este tipo de producción con origen en los yacimientos



minerales es llamada primaria, mientras que aquella producción que proviene del reciclaje de chatarra (la cual en algunos metales cobra gran relevancia), recibe el nombre de secundaria. A su vez, tal como se mencionó en la demanda de minerales, el horizonte temporal que se defina para caracterizar la oferta es fundamental.

### **Factores determinantes de la oferta**

En términos concretos, la oferta de los minerales se ve influenciada por una gran cantidad de factores, no obstante, algunos de los más relevantes son: el propio precio, costos de factores en la producción de un mineral, el cambio tecnológico, interrupciones, actividades de gobierno y la presencia de estructuras de mercado.

El propio precio de un mineral resulta determinante a la hora de definir la cantidad a producir por las firmas, pues, según lo visto en los antecedentes de microeconomía, una industria producirá hasta que sus costos marginales se igualen a sus ingresos marginales. Por lo tanto, un aumento o caída en el precio debería ser seguido de subidas o caídas en la producción. No obstante, esta situación se ve atenuada por las distintas restricciones existentes en cada período de tiempo considerado, tanto por los inventarios, capacidad existente, yacimientos conocidos o tecnología utilizada. Además, se debe destacar que la minería y procesamiento son actividades de intenso uso de capital, con instalaciones de larga vida útil, lo que involucra poca flexibilidad de la industria para responder ante variaciones del precio.

Dado el supuesto de que la industria producirá hasta igualar su ingreso marginal con sus costos marginales, el costo de los factores productivos que utiliza la industria minera (trabajo, capital o acceso a recurso natural) afectará la utilidad de las firmas y podría llegar a inhibir proyectos o motivar el cierre de otros.

El concepto de interrupciones se refiere típicamente a huelgas o accidentes, que ocurren repetidamente a lo largo de la industria minera y que causan trabas en la producción de un mineral. Del mismo modo, las actividades de gobierno, que se traducen como normativas ambientales, laborales o tributarias, pueden provocar el cese obligado de una industria o aumentar considerablemente sus costos. El caso más representativo se puede apreciar en las fundiciones presentes en Europa, las cuales paulatinamente se ven obligadas a cerrar por el aumento de sus costos y mayores requerimientos ambientales por parte de los gobiernos locales. En contrapartida, el cambio tecnológico da pie no sólo a la reducción del costo de producción de un mineral, sino que puede dar la posibilidad de extraer minerales desde fuentes previamente no económicas (menores leyes o de complejidad metalúrgica), como fue el caso del proceso de flotación en los minerales sulfurados de cobre o el proceso de lixiviación, extracción por solventes y electro – obtención para los minerales oxidados de cobre.

Otro componente que resulta relevante en la estructura de costos de algunos commodities corresponde al transporte. En general este ítem no alcanza una proporción dominante para el caso de los metales preciosos o base (por lo cual puede no estar totalmente interiorizado para la minería chilena), pero sí en casos como el mineral de hierro o los commodities energéticos:

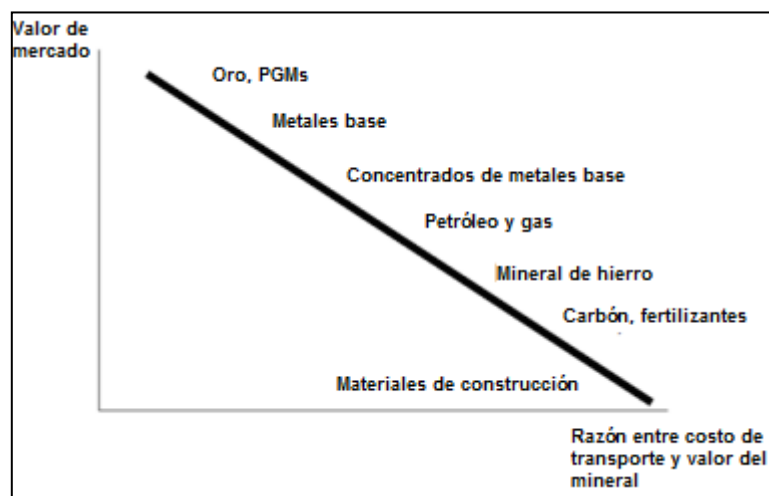


Figura 5 Costos de transporte y valor de commodities minerales. Fuente: Trade in minerals. P. Maxwell (2006).

De esta manera, el porcentaje de participación del costo de transporte en el valor final del mineral puede tener una relación directa con la manera que se comercializa el commodity. En términos concretos, la información anterior provee un respaldo al hecho de que países como Australia comercialicen gran parte de sus commodities de alto valor (en relación al costo de transporte) alrededor de todo el mundo, mientras que aquellos de menor valor respecto de su costo de transporte sean distribuidos en mercados más limitados. Así, los mayores mercados para el mineral de hierro o el carbón australiano se encuentran en las potencias asiáticas, mientras que enfrenta una mayor competencia en mercados europeos o africanos (Maxwell 2006).

La presencia de estructuras de mercado indica la manera en que se maneja el mismo. Por ejemplo, una alta concentración puede traducirse en que los productores opten por fijar un “precio de productor” (destruyendo demanda) o el caso extremo de un monopolio puede llevar a cargos muy por sobre el costo marginal de la extracción y procesamiento del mineral. A su vez, la presencia de propiedad estatal de las empresas mineras podría traducirse en cambios sobre los objetivos de la empresa, generando cambios en la forma en que se expresa el pensamiento racional de los agentes, es decir, no sólo maximizando las utilidades financieras.

La oferta de minerales puede ser desagregada en virtud del origen de los mismos, por un lado se presenta la producción primaria, cuyo origen es el yacimiento, e incluye las distintas categorías de productos que se pueden encontrar, mientras que la producción secundaria se refiere a la oferta de material proveniente del reciclaje de chatarra (o “scrap”).

### **Producción primaria**

De manera análoga a lo descrito en el punto sobre la demanda de minerales, el horizonte temporal se relaciona considerablemente con las restricciones de la oferta y su elasticidad precio de la oferta, pues se aprecia que la oferta es bastante sensible ante variaciones del precio hasta que se acerca a los niveles limitantes de producción. Así, la distinción entre inmediato, corto, largo y muy largo plazo, creará variadas diferencias en el tratamiento de la oferta de minerales.

Una importante diferenciación que puede darse en el área de la oferta de minerales, se da en la distinción de las curvas de oferta según la estructura de mercado imperante. Por un lado se puede dar un tipo de mercados competitivos, mientras que por otro se da un tipo de mercado basado en el precio productor. Este último se caracteriza por ser un mercado donde el precio es fijado por unos pocos productores, al cual venden su producción, a diferencia de los mercados competitivos, donde el precio se determina por la interacción de la oferta y la demanda y (en teoría) ningún agente tiene capacidad de control sobre el precio.

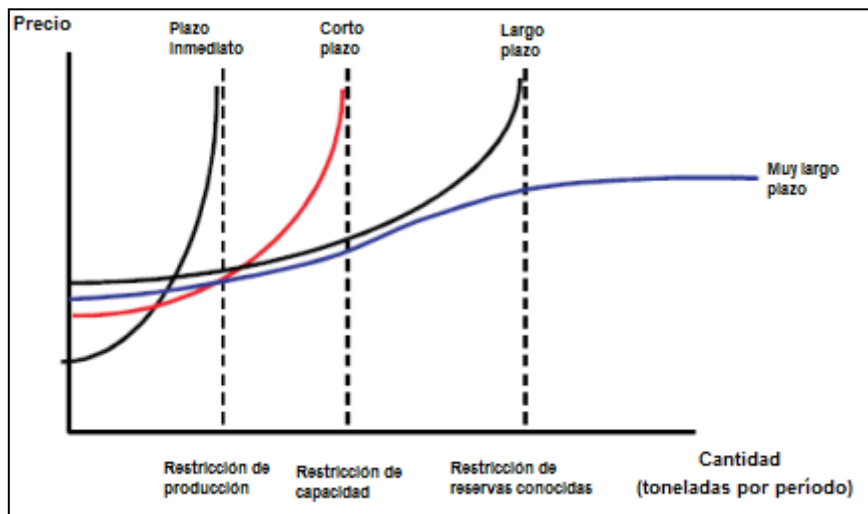
Tal como se había mencionado en la sección anterior, en el plazo inmediato las firmas no poseen tiempo suficiente para alterar la cantidad entregada al mercado, por lo cual la oferta no puede exceder la tasa actual de producción más los stocks que se manejen por los distintos agentes. Otra característica importante es que una empresa no debe necesariamente vender toda su producción en caso de precios bajos, pues tiene la posibilidad de crear inventarios, por lo cual la forma de la curva de oferta en el plazo inmediato no toma una forma tan elástica o “inclinada” como podría suponerse. Esto se explica por el hecho de que la oferta se limita por la capacidad de venta de stocks, donde además su elasticidad disminuye.

En el corto plazo los productores son capaces de cambiar la producción, pero no la capacidad. Esta definición se vuelve relevante cuando la industria no está operando a un cien por ciento de su capacidad, en este caso, la curva de forma mostrada para el caso inmediato se extiende hacia la derecha, en el monto equivalente a la capacidad ociosa que existía.

El marco que entrega una mirada de largo plazo permite a los productores el desarrollo de nuevas minas junto a la construcción de nuevas plantas de procesamiento. También pueden darse aumentos de capacidad o expansiones de las operaciones actuales. De este modo, esta curva se caracteriza por poseer una fracción más elástica (o sensible) ante el precio, que sólo se limita cuando la totalidad de yacimientos existentes se encuentran en operación.

Finalmente, el concepto de muy largo plazo viene asociado con el levantamiento de las restricciones impuestas por los factores de producción tomados como fijos en los otros horizontes. Por un lado las firmas tienen el tiempo y capacidad para generar exploración para encontrar nuevos depósitos o nuevos cambios tecnológicos que hagan viables nuevas fuentes de recursos.

La siguiente figura resume las distintas curvas de ofertas que se dan para la producción primaria de un producto principal:



**Figura 6 Curva de oferta de metales en distintos horizontes temporales. Fuente: Mineral supply - Exploration, production, processing and recycling. P. Maxwell (2006).**

Al igual que otras industrias competitivas, las firmas en los mercados de minerales operarán en el corto plazo mientras el precio se encuentre por sobre sus costos marginales, debido a la capacidad de solventar sus costos fijos (o hundidos) durante ese horizonte temporal. No obstante, a largo plazo se esperaría que el precio se ubique por sobre los costos medios totales, para mantener la presencia de las firmas en el mercado. Otras condicionantes para la entrada y salida de las empresas se da por la presencia de altas barreras de entrada o de salida, que podrían hacer que se mantengan en su posición, aun cuando el precio varíe más allá de los rangos mencionados.

Otro tipo de producción relevante que nace del estudio de la oferta de minerales se da por la presencia de minerales que aparecen como subproductos o co productos de otros, cuyo nombre proviene de los minerales que se extraen y recuperan a partir del mismo cuerpo mineralizado. Los co productos se dan cuando se extraen dos o más minerales de una mina y ninguno se impone sobre otro en la planificación minera ni en la valorización financiera de la empresa. El caso de los subproductos difiere en el hecho de que el precio del subproducto no influye mayormente sobre la producción de la mina, pues se planifica en función del mineral principal.

Una importante característica de los minerales es que la oferta de éstos puede darse a través de las distintas fuentes mencionadas, por lo cual la curva de oferta primaria debe agregar aquella producción proveniente de cada una de las tres formas. Tal es el caso de la producción de molibdeno, oro o plata.

El análisis de la oferta de subproductos debe considerar una importante restricción, la cual se refiere a que la producción se verá limitada a la extracción del producto principal. Por ejemplo, la cantidad de molibdeno recuperado desde un pórfido cuprífero no podrá exceder a la cantidad física disponible en el mineral de cobre. Esta limitante volverá más inelástica la curva de oferta, pues una variación del precio del subproducto no incrementará la cantidad del producto principal, de otra manera no correspondería a un subproducto del mineral principal. La situación descrita se muestra en la siguiente imagen:

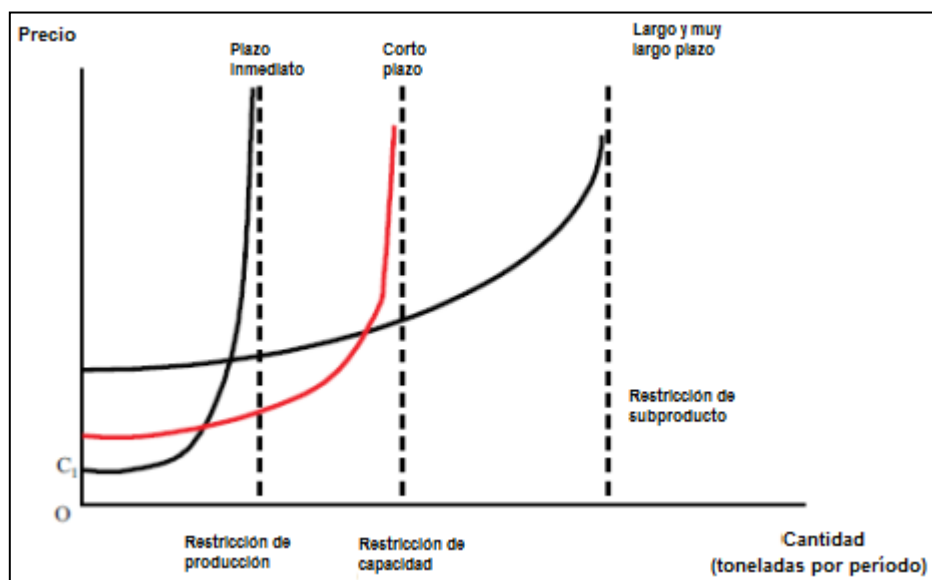


Figura 7 Curva de ofertas para subproductos. Fuente: Mineral supply - Exploration, production, processing and recycling. P. Maxwell (2006).

Otra importante diferenciación para el caso de los subproductos es la manera en que deben atribuirse los costos de explotación y procesamiento. A diferencia de los productos principales, los subproductos sólo se ven afectados por sus costos específicos. Los costos conjuntos, que son necesarios para la producción de ambos minerales, son cargados completamente por el producto principal y no afectan la oferta del subproducto. Esta situación indica que este tipo de oferta estará disponible a menores precios de lo que sería para una mina que produzca el mismo mineral como producto principal.

En términos relativos, los co productos se ubican entre los subproductos y los productos principales. Dado que para esta situación los precios de ambos minerales son relevantes en el desarrollo de la mina, los costos deben ser compartidos. Así, un co producto no debe cubrir sólo sus costos específicos, sino que también parte de los costos conjuntos.

La curva de oferta de los co productos es similar a aquella mostrada para un producto individual. La diferencia radica en que la producción puede estar disponible en el mercado a menores costos, dado que sólo se le asigna un porcentaje de los costos incurridos en la producción de ambos minerales.

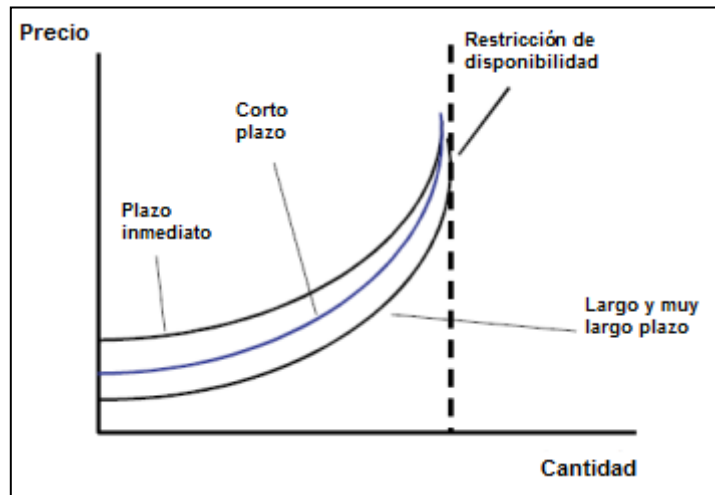
### **Producción secundaria**

La producción secundaria cobra gran importancia para el caso de los metales (no así en otro tipo

de minerales), pues el reciclaje de chatarra nueva o antigua se agrega a la oferta total del mercado. En primer lugar, la chatarra nueva proviene del descarte del material proceso de manufactura de bienes que se generan por primera vez, mientras que la chatarra antigua hace referencia al material existente en bienes durables que llegan al final de su vida útil. De este modo, la restricción más importante en la oferta de chatarra corresponde a la disponibilidad de la misma, la cual debe tratarse de forma separada, como chatarra nueva y antigua.

La cantidad disponible de chatarra nueva depende directamente de tres factores principales: consumo total del metal, distribución de consumo por uso final y el porcentaje de chatarra nueva generada por cada uso final. En primer lugar, un aumento en el consumo total aumenta la disponibilidad de chatarra nueva, permitiendo una expansión de la oferta secundaria en el largo plazo. En contraparte, un cambio tecnológico en el proceso de manufactura que permita una reducción en la generación de chatarra nueva en alguno de sus usos finales, generará un cambio contrario en la

curva de oferta secundaria de largo plazo. La curva de costos de la oferta secundaria para la chatarra nueva se presenta en la siguiente imagen:



**Figura 8** Curva de oferta de chatarra nueva. Fuente: Mineral supply - Exploration, production, processing and recycling. P. Maxwell (2006).

La curva refleja los costos de recolección, identificación y procesamiento de chatarra nueva. Aquella de menores costos será procesada en primer lugar (período inmediato), dando plazo a las fuentes de mayores costos a medida que se agotan las primeras (largo plazo). El hecho de los menores costos para la producción de la oferta de chatarra nueva hace que casi toda ésta sea reciclada, por lo cual en un rango normal de precios, esta fuente de oferta se encontrará a los limitantes de su disponibilidad.

El caso de la oferta secundaria por parte de chatarra antigua es distinto a la nueva a la hora de definir los factores que afectarán su disponibilidad. Así, cada año, dependerá del flujo de metal contenido en los bienes que llegan al final de su vida útil y del stock del metal contenido en bienes que ya no se encuentran en uso al inicio de cada año que aún no ha sido reciclado. En primer lugar, el flujo de chatarra antigua dependerá del número y tipo de bienes que se usen en el mercado, la cantidad de metal que portan y la cantidad de años de vida útil. Por otro lado, el stock de chatarra antigua corresponde a los flujos acumulados de chatarra antigua, descontando la cantidad reciclada y puesta nuevamente en el mercado. La forma de la curva de chatarra antigua destaca la disponibilidad de chatarra desde costos comparables a la chatarra nueva (tanto de recolección como procesamiento), pero que crecen rápidamente a medida que se consumen los mejores stocks. Otra característica importante corresponde a las restricciones de corto y largo plazo. En este caso, la oferta de chatarra antigua en el corto plazo se ve limitada por una cantidad mayor que la de largo plazo. La razón detrás de esto se debe a que la cantidad de chatarra reciclada en el corto plazo, cuando el precio aumenta de tal manera de volver rentables fuentes de

mayor costo, no estará disponible en el largo plazo, pues se agotará. Así, se da que la elasticidad precio de la oferta de chatarra antigua es mayor en el corto plazo que en el largo plazo, a diferencia de lo que ocurre en las otras fuentes de oferta.

### 2.3. El problema intertemporal

Una de los principales problemáticas que se presentan en el estudio de la economía de minerales corresponde a la extracción de un stock fijo (de tamaño generalmente desconocido) de recursos, para los cuales se debe contrastar su utilización en distintas fechas.

Considerando el problema de forma simplificada, la sociedad debe decidir cuánto consumir en cada período, considerando un stock fijo de recurso ( $S_0$ ) que no varía con el tiempo, dos períodos de tiempo ( $t=0, 1$ ) y que el recurso no se deteriora con el tiempo (sin depreciación). Claramente, cuánto más se consume en el período 0 habrá menos disponible en el período 1, lo cual afectará el beneficio social que se puede alcanzar en otro período. Así, aun con las simplificaciones del problema, es posible apreciar claramente el dilema económico que se enfrenta, sobre la capacidad de valorar o intercambiar recursos, cuyo beneficio depende de la decisión que se tome en distintos períodos de tiempo.

Denotando el vector  $q = (q_1, q_2)$ , ( $q_i > 0$ ) los consumos para cada fecha, se presenta la función de indiferencia (o beneficio social del consumo) como una función estrictamente cóncava, diferenciable y monótona creciente ( $u = u(q_1, q_2)$ ). Así, los supuestos de racionalidad de los agentes económicos permiten asumir que se buscará maximizar el nivel de indiferencia. Además, el plan que se llevará a cabo debe estar acotado por el stock de recursos existentes por lo cual el consumo total no podrá exceder la disponibilidad, formalmente  $q_1 + q_2 \leq S_0$ .

La consideración sobre monotoneidad creciente sobre la función de indiferencia indica la no saciedad de la misma, por lo cual el problema encontrará un máximo en cuando  $q_1 + q_2 = S_0$ . Por otro lado, considerando la existencia de un vector de consumo óptimo ( $q^* = (q_1^*, q_2^*)$ ), debe cumplirse la condición de equilibrio y eficiencia, esto significa que el beneficio marginal que entrega el consumo en cada período sea el mismo para el vector  $q^*$ , sino de otro modo sería conveniente traspasar recursos de un período a otro. En términos matemáticos, se debe cumplir que  $\frac{du(q_1, q_2)}{dq_1} = \frac{du(q_1, q_2)}{dq_2}$ .

El problema planteado, de aparente simple resolución, conlleva múltiples complicaciones, principalmente con las variaciones e incertezas que afectan los stocks de recursos y también los cambios que pueden ocurrir con las preferencias de la sociedad, manifestadas a través de su principal indicador que es el precio del recurso,



pero también incorporando los deseos de futuras generaciones o el valor que tienen los recursos en el presente en contraste al futuro, que se manifiestan a través de la elección de la tasa de descuento relevante (equivalente a una tasa de preferencia intertemporal) utilizada en la evaluación.

Hasta este punto, se debe destacar que el análisis no ha considerado un valor distinto de la función de beneficio en cada período, lo cual debe ser corregido a través de otro parámetro, como lo es la tasa social de descuento. Esta variable corresponde a otro de los grandes problemas que se dan en la evaluación social, pues conlleva inherentemente el valor que tiene el beneficio de las generaciones futuras para aquellos que se encuentran en el presente realizando la evaluación.

Según la literatura (Dasgupta y Heal 1978) existen tres supuestos inherentes a la problemática que deben ser enfatizados en el estudio del equilibrio intertemporal de los recursos agotables: mercado de futuros, definición de consumidores y sobre valor presente de beneficios futuros. En primer lugar, la existencia de un mercado desarrollado de futuros, en el cual se puedan comprar y vender bienes y servicios en cualquier fecha futura. La ausencia de esta característica indicaría que un determinado mineral que puede comercializarse en un tiempo  $t=0$ , no podrá ser comercializado en un futuro. Así, todo oferente que desee vender en el futuro incurre en un riesgo o incertidumbre, que es inexistente en el presente. Una excepción a esta condición, es que los precios que se mantendrán en el futuro sean conocidos o que el productor tenga bastante confianza en su capacidad para predecir el precio. En términos concretos, la ausencia de un mercado de futuros para un determinado mineral generará que el sistema de precios spot no refleje o sea incompatible con las características que prevalecerán en un tiempo lejano.

En segundo lugar, se presenta el hecho de que la teoría del equilibrio competitivo contempla consumidores bien definidos. Así, es significativo el hecho de que varios consumidores no existirán en el tiempo en que se tomen las decisiones acerca de la extracción del recurso natural. En otras palabras, el problema que se debe resolver corresponde al conocimiento acabado de las futuras generaciones, a modo que sean bien representadas en el presente. De este modo el problema se da por el desconocimiento de las preferencias de los individuos del futuro y por otro, la dotación inicial de factores que tendrán los individuos que no han nacido no se ve de forma clara, pues por lo menos una parte de los recursos del futuro se consideran obsequios de las decisiones actuales tomadas por los individuos vivos. Luego, la discusión debe centrarse en el modo que el libre mercado asigna los recursos de forma intertemporal, es decir, la distribución intertemporal de bienes y servicios.

En tercer lugar e íntimamente ligada a la primera problemática, se da la característica de que la única restricción presupuestaria que enfrentan los agentes es que el valor presente de las diferencias entre ingresos y costos sea no negativo. Para notar la relevancia de esta situación es necesario entender la regla dominante que permite a los agentes involucrados grandes pérdidas siempre y cuando las ganancias netas no sean negativas.

De acuerdo a las limitantes mencionadas, la teoría de agotamiento de los recursos naturales se presenta como una herramienta válida al momento de localizar sesgos o desviaciones en la asignación de los recursos cuando se presenta alguna falla según la construcción general de la teoría en el mundo real. En particular, el hecho de dejar hacer al mercado (*laissez faire, laissez passer*), dado que las fuerzas de la oferta y la demanda asegurarán una asignación eficiente de los recursos naturales en el tiempo, se presenta como una situación ideal que requeriría bastantes condiciones para poder justificarse o defenderse.

## 2.4. Modelos de agotamiento de recursos minerales

### 2.4.1. El modelo básico

El primer acercamiento para modelar el agotamiento de recursos agotables (Hotelling 1931) se realizó en virtud de la preocupación sobre la extracción social óptima de recursos no renovables y la evolución que se daría sobre los precios y reservas presentes. La problemática inicial para una industria competitiva, considerada parte de la base de los trabajos sobre agotamiento de recursos no renovables, se presenta de la siguiente manera:

$$\text{máx} \int_0^{\infty} e^{-\rho \cdot t} \cdot u(q(t)) \cdot dt \quad (1)$$

La función anterior refleja la búsqueda del máximo beneficio en el horizonte temporal considerado. Así, la utilidad ( $u$ ) en un primer acercamiento sólo depende del nivel de extracción ( $q$ ) que se realice en cada período. El término restante corresponde al factor de descuento aplicado en cada período, el cual utiliza una tasa de descuento relevante  $\rho$ , la cual podría ser variable en virtud del tiempo que se considere, pero una simplificación del problema consiste en considerarla constante.

A su vez, el problema anterior debe reflejar el hecho de que el recurso se agota, es decir, existe un stock inicial y final de reservas, que deben cumplir con las siguientes restricciones:

$$\int_0^{\infty} q(t) \cdot dt = R_0 - R_{\infty} \quad (2)$$

$$R_{\infty} \geq 0$$

La ecuación anterior permite relacionar la extracción total de los recursos con la variación de las reservas. La expresión análoga de la restricción anterior corresponde a:

$$\dot{R} = -q(t) \quad (3)$$

De este modo queda planteado el problema inicial de agotamiento de recursos, en el cual se busca obtener el máximo beneficio (determinado de forma social o privada) asociado a la extracción de un recurso con un stock limitado.

La manera de enfrentar el problema se presenta a través de los conceptos de optimización dinámica, en particular con aquellos asociados a la teoría del control óptimo. Esta teoría permite resolver problemas dinámicos de naturaleza muy variada, donde la evolución de un sistema que depende del tiempo puede ser controlada en parte por las decisiones de un agente (ver Anexo B). La teoría nos provee de las herramientas necesarias para llegar a importantes conclusiones. De este modo, la expresión característica del Hamiltoniano, tomando la utilidad como la resta entre los ingresos ( $p \cdot q$ ) y los costos ( $C(q)$ ), queda dada por:

$$H^c = e^{-\rho t} \cdot (p \cdot q - C(q)) - \lambda \cdot q \quad (4)$$

Donde  $\lambda$  denota al vector de co-estado que muestra la variación del beneficio marginal en cada período. El problema alcanza un óptimo al verificar las siguientes condiciones:

$$\frac{\partial H_t^c}{\partial q_t} = 0 \quad (5)$$

$$\dot{\lambda}(t) = -\frac{\partial H_t^c}{\partial R_t}$$

Así, las condiciones de optimalidad del problema corresponden a:

$$\lambda = e^{-\rho t} \cdot (p - C_q) \quad (6)$$

Donde  $C_q$  denota a la derivada parcial de la función de costos con respecto a la cantidad extraída. Además, combinando ambas condiciones de optimalidad se obtiene:

$$\rho = \frac{\dot{p} - \dot{C}_q}{p - C_q} \quad (7)$$

La notación  $\dot{x}$  indica la derivada con respecto al tiempo para la variable  $x$ .

Esta condición refleja el crecimiento del margen de utilidad en un valor equivalente en la tasa de interés. La primera aproximación de Hotelling considera costos de extracción nulos, por lo cual llega a la conclusión que los precios de los commodities extraídos deben crecer de manera exponencial a una tasa  $r$ .

Finalmente, la última restricción proviene del agotamiento de las reservas:

$$\dot{R} = -q(t) \quad (8)$$

En esta primera aproximación, Hotelling también resuelve el problema que plantea una firma monopólica, mostrando un resultado similar, cambiando el precio de mercado por el ingreso marginal, el cual aumenta a la tasa de interés.

#### **2.4.2. Agotamiento de reservas**

Una de las primeras modificaciones que se pueden realizar al modelo de Hotelling para representar situaciones más cercanas a la realidad corresponde a la posibilidad de que los costos de extracción no sólo dependan de la extracción de cada período, sino que también de las reservas restantes. Esto indicaría que la función  $C(q, R)$  aumenta a medida que se agotan las reservas, lo cual representa la realidad en el hecho de la complicación de la extracción de menas más profundas o de caídas en las leyes de las mismas, con el consiguiente aumento en costos metalúrgicos, como son los casos de los yacimientos tipo pórfido cupríferos chilenos. De esta manera, al resolver el problema mostrado en (4) conforme a los cambios en la función de costos, provoca que la solución del problema planteada en (7) varíe como se muestra a continuación:

$$\rho + \frac{C_R}{\lambda} = \frac{\dot{p} - \dot{C}_q}{p - C_q} \quad (9)$$

Dado que  $C_R < 0$  (los costos aumentan con la disminución de reservas), se da que el crecimiento del margen ocurre de manera más pausada que en el caso anterior. Los datos de mercado para diversos commodities minerales, entre ellos el cobre, muestran que los precios no sólo no aumentan, sino que han caído por largos períodos de tiempo. Esta característica de los mercados se puede modelar a través de otros supuestos, como la exploración, el cambio tecnológico, el reciclaje y los inventarios.

### 2.4.3. Exploración

Una de las determinantes que apoya el no agotamiento de las reservas para los recursos no renovables corresponde a la exploración, que permite un aumento de reservas conocidas y generalmente una caída en los costos. Considerando que las reservas varían al agregar una cantidad acumulada  $D$  de descubrimientos (la cual varía en un valor  $\dot{D}$ ), que a su vez dependen del “esfuerzo” ( $w$ ) que cada firma destine a la tareas de exploración, caracterizado como un costo  $C^D(w)$ . De este modo, la variación de reservas descubiertas se representa como:

$$\dot{D} = f(w, D) \quad (10)$$

Siendo la función  $f$  creciente en función del esfuerzo de exploración ( $w$ ) y decreciente con la cantidad descubierta ( $D$ ). Ambas condiciones indican que una mayor exploración radica en mayores aumentos de reservas, pero éstas van decayendo a medida que quedan menos yacimientos que encontrar. Así, la ecuación que muestra la evolución de las reservas queda definida como:

$$\dot{R} = \dot{D} - q = f(w, D) - q \quad (11)$$

Si al problema original planteado en (4) se agregan las nuevas condiciones dadas por (11) y considerando que los costos marginales de extracción son sólo dependientes según el nivel de reservas existentes ( $C_q = C^*(R)$ ), la solución de la optimización del problema inicial corresponde a (Pindyck 1978):

$$\dot{p} = \rho \cdot (p - C_q) + C_{qR} \cdot \dot{D} \quad (12)$$

Reescribiendo la ecuación (7) bajo el supuesto de  $C_q = C^*(R)$ , se muestra el aumento sostenido del nivel de precios a la tasa utilizada:

$$\dot{p} = \rho \cdot (p - C_q) \quad (13)$$

A diferencia del modelo original mostrado en (13), la expresión desarrollado por Pindyck en (12) contiene un segundo término que consta de la variación por nuevos descubrimientos que es no negativo ( $\dot{D}$ ), mientras que el término  $C_{qR}$  presenta un valor menor a cero (los costos aumentan a medida que se agotan las reservas), por lo tanto su multiplicación corresponde a un valor negativo. Esta situación da lugar a que los precios puedan ser modelados en períodos de caídas sostenidas, en virtud de la cantidad de nuevas reservas incorporadas a la explotación de un determinado recurso mineral a un menor costo.

#### 2.4.4. El cambio tecnológico

Además del modelo presentado en el punto anterior, existen más variables que pueden afectar una caída en los precios de un mineral. Si bien consideraciones tales como el crecimiento en el tamaño del mercado caracterizan una determinada industria, para el caso de los minerales el cambio tecnológico, manifestado como nuevas técnicas y procesos geo - minero - metalúrgicos, ha revolucionado cada uno de los mercados de commodities.

Retomando el modelo anterior, se incluye el hecho de que los cambios tecnológicos afectan la curva de costos de manera que ante mejoras tecnológicas ( $\tau$ ) los costos disminuyen. Formalmente,

$$C(q, R, \tau) \text{ y } C_\tau < 0$$

Una manera de facilitar el análisis proviene de considerar una ecuación de costos de la siguiente manera (Slade y Thille 2009):

$$C(q, R, \tau) = h(\tau) \cdot C^1(R) \cdot q \quad (14)$$

De esta manera, la ecuación que determina la evolución del precio queda de la siguiente manera:

$$\dot{p} = \rho \cdot (p - C_q) + C(R) \cdot h'(\tau) = \rho \cdot (p - C_q) + C_{q\tau} \quad (15)$$

Así, el segundo término del lado derecho de la ecuación representa la tasa de cambio del costo marginal ante los cambios tecnológicos. Además, dada el valor negativo de este término, los precios podrían caer.

Tanto el modelo en consideración de exploración como el de cambio tecnológico muestran que ligeros ajustes al planteamiento de Hotelling permiten retratar algunos rasgos característicos de la realidad en los mercados de minerales.

#### **2.4.5. Durabilidad y reciclaje**

A diferencia de los commodities energéticos, los minerales pueden ser reciclados después de ser utilizados una vez. De este modo, se puede agregar una nueva variable de estado, representada por el stock de recursos en circulación el cual se deprecia lentamente:

$$\dot{S} = q - \delta \cdot S \quad (16)$$

Aquí el término  $\delta$  representa la depreciación del stock del recurso natural. En el equilibrio debe cumplirse que el costo marginal de mantener una unidad en stock debe igualarse al costo de oportunidad de la inversión ( $\rho \cdot p$ ), el valor monetario de la depreciación ( $\delta \cdot p$ ) y la ganancia de capital ( $\dot{p}$ ).

#### **2.5. La renta económica en la industria minera**

El concepto de renta económica se manifiesta de forma intrínseca al área de la extracción de mineral, por tratarse de la justificación hacia las distintas políticas tributarias especiales hacia la industria. A modo de definición, la renta económica debe entenderse como el exceso de ingresos por sobre los costos totales de producción, considerando incluso aquel porcentaje relativo a un nivel normal de utilidades (Harman y Guj, Mineral Taxation and Royalties 2006). Así, un nivel normal de utilidades es aquel retorno financiero hacia los inversionistas, necesario para atraerlos a la industria y mantener las inversiones en el área. El concepto se puede entender como el valor del capital otorgado por los inversionistas, definido por su costo de oportunidad en otros negocios a un nivel de riesgo similar, valor relacionado a la tasa de descuento.

En términos concretos, el concepto de costo de oportunidad del capital proviene del área financiera; se puede ilustrar esto considerando el modelo de costo promedio

ponderado del capital o WACC<sup>3</sup> (por sus siglas en inglés). La siguiente imagen ilustra el concepto de renta económica a través de los distintos costos en que incurre una firma:

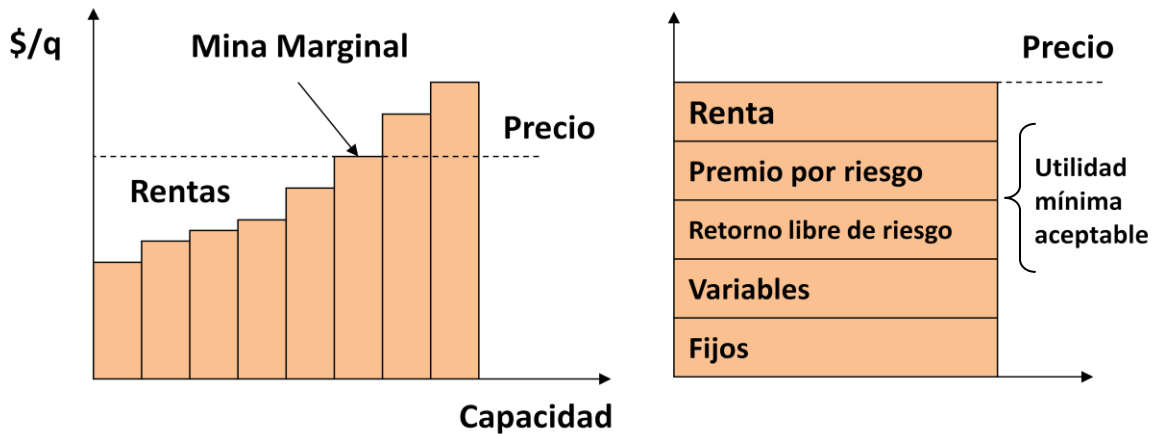


Figura 9 Representación de renta económica. Fuente: Apuntes Economía Minera. OArameda (2011).

En términos generales, la renta económica proviene de alguna de las siguientes fuentes de escasez:

- Cambios en la oferta o demanda de un producto.
- Acciones gubernamentales o de empresas para modificar las cantidades y así obtener mayores precios.
- Aparición de nuevas tecnologías de producción o nuevos productos.
- Cualidades innatas otorgadas por la naturaleza hacia los factores de producción o los productos.

Los factores previamente mencionados permiten generar mayores precios, menores costos o ambos, lo que permite generar un mayor margen sobre los costos de producción. Si bien la presencia de la renta económica no es exclusiva de la industria de los minerales, en este sector se puede mantener en el tiempo gracias a sus características únicas:

- Alta volatilidad en períodos de límite de producción en la demanda, lo que genera importantes fluctuaciones en los precios, indistintas de los costos de producción.
- Diferencias en la calidad de los recursos minerales, donde esta diferencia en calidad (leyes) y otras condiciones inherentes al recurso, permiten importantes

<sup>3</sup> Weighted average cost of capital



diferencias en los costos de producción de un determinado commodity, generando mayores excedentes para los productores de menores costos.

- Altas barreras de entrada en la industria, manifestado por el hecho de ser un sector intenso en utilización de capital, lo que se traduce a su vez en la presencia de economías de escala en la producción. Esta característica significa una condición natural para formación de carteles, con su consecuente manejo en los precios (como el caso del petróleo con la OPEP).

Las fuentes de la renta económica en el área de los minerales pueden agruparse en dos grupos principales, asociados a la renta por escasez generalizada y aquella renta diferencial (por características propias del yacimiento).

La idea de escasez generalizada se produce debido a que la oferta se mantiene en niveles menores a los requeridos por la demanda, ya sea en corto o largo plazo. En el corto plazo, un incremento en la demanda (que no se vea acompañado por aumentos en la cantidad ofertada) provocará aumentos de precios que desembocan en renta económica que perdura mientras no se produzca la inversión necesaria para desarrollar nuevas operaciones e incrementar producción. En el largo plazo, las rentas económicas deberían eliminarse debido a la aparición de nuevas fuentes de oferta. En el caso de que las fuentes sean insuficientes y el precio mantenga su tendencia al alza, las reservas podrían agotarse o se podría dar paso a la utilización de algún producto sustituto.

El hecho de que las reservas de minerales difieran según calidad, forma parte del concepto de renta diferencial. Un claro ejemplo de esta situación proviene de los menores costos medios que poseen las firmas que operan yacimientos de mayores leyes o de mejor composición mineralógica. Otra consideración proviene del lugar en que se encuentre emplazado el yacimiento, pues puede darse que una mina que se encuentre más cercana a los puntos de venta o a las redes de distribución, aun manteniendo la misma calidad del recurso y precio que otra, tenga una ventaja en costos comparativamente.

En términos gráficos, la siguiente imagen manifiesta la renta económica producto de distintas minas (Harman y Guj 2006):

	Mina de alta ley	Mina de baja ley	Mina marginal (sin renta)
Precio	Renta generalizada	Renta generalizada	
	Renta diferencial	Costo de producción	Costo de producción
	Costo de producción		

Figura 10 Renta económica en minería. Fuente: Mineral taxation and royalties. F. Harman and P. Maxwell (2006).

El caso de la renta monopólica que se produce cuando un productor crea un nivel de escasez artificial puede darse a través de distintos mecanismos, entre los que se encuentran los arreglos de carteles para reducir producción y forzar el aumento de los precios de mercado.

## 2.6. Políticas públicas en economía de minerales

La extracción de sustancias minerales genera enormes cambios en el desarrollo social y financiero de un país o localidad en que se encuentren. Así, nace un interés natural sobre el rol que debe cumplir el Estado como dueño del recurso y garante del desarrollo social.

En línea con la idea anterior, la búsqueda se centra en alcanzar los máximos de eficiencia económica y bienestar social, es decir, la condición de que la sociedad está lo mejor que puede estar, dada la dotación de factores disponibles. Así, el rol del gobierno en la sociedad busca alcanzar estos puntos óptimos y mantenerlos dinámicamente a través del tiempo. Para ello, su trabajo se distribuye en cuatro funciones principales (Maxwell y Guj 2006):

- Administrar la estructura legal e institucional en la cual operan los mercados.
- Intervenir en la utilización de recursos en áreas donde una política resulte beneficiosa.
- Búsqueda de entregar estabilidad en condiciones económicas.
- Redistribuir ingreso y riquezas.

Un gobierno utiliza una serie de herramientas (políticas) para cumplir sus funciones. Dentro de los distintos enfoques, en la realidad existen políticas dirigidas a distintos sectores industriales; por ejemplo, agricultura, minería, manufactura, transporte, comunicaciones, salud, entre otros. Una política enfocada a la minería se relaciona con el desarrollo racional de los recursos minerales y energéticos para alcanzar los objetivos económicos de la sociedad.

En un entorno competitivo, una utilización óptima de los recursos en una determinada área geográfica puede llevar a puntos de eficiencia económica, no obstante, el hecho de que las industrias generan la mayor cantidad de bienes y servicios dada su dotación de factores no asegurará una adecuada distribución. Así, las decisiones gubernamentales se ven influenciadas por el principio de optimalidad de Pareto en la búsqueda de maximizar ambas componentes de la economía.

En particular, para el caso de los minerales se estudiarán tres formas en que un Estado o la sociedad se involucran en los mercados de minerales. Si bien la mayor parte de las políticas enfocadas a los minerales buscan corregir las externalidades mencionadas en los puntos anteriores, se destaca la renta económica generada por las minas como la mayor justificación de una política especial para la industria, generando en la mayor parte de las ocasiones un potencial importante en materia tributaria. Otras consideraciones que tiene la sociedad para intervenir en la producción de minerales tienen relación con el bienestar de las futuras generaciones y elementos estratégicos que pueden involucrar al Estado en el manejo de la producción para así cumplir sus propios objetivos.

### **2.6.1. Antecedentes tributarios**

Probablemente el mayor desarrollo en políticas públicas asociadas a los minerales se da en los estudios tributarios. La presencia de la renta económica en el sector se vuelve un concepto clave, por lo cual una carga impositiva especial se vuelve relevante en el sector para alcanzar niveles mayores de eficiencia y distribución. Así, los impuestos que gravan a la industria no corresponden sólo a aquellos típicos de los demás sectores, sino que se incluyen impuestos tipo royalties, sobre los ingresos o por exceso de utilidades. Teóricamente, la extracción de la renta económica a través de impuestos no cambia el nivel óptimo de producción de la operación minera, debido a que todos los costos, incluyendo aquellos asociados a la adecuada remuneración al factor capital, se encuentren cubiertos.

La implementación de un sistema tributario debe contar con dos partes críticas, divididas entre la base del impuesto y la tasa. La base se refiere al objeto desde el cual se recolecta el impuesto, mientras que la tasa es la proporción aplicada a la base. Idealmente, como ha sido mencionado, la base debería ser la renta económica derivada

de la actividad minera y la tasa debería ser la óptima que permita compartir las rentas entre el Estado y la compañía privada. Si bien existe la posibilidad de extraer el 100% de la renta económica, se prefiere mantener un porcentaje menor como un incentivo a la eficiencia de las operaciones y permitiendo el margen de error respectivo sobre el cálculo de la renta económica (Harman y Guj 2006).

La búsqueda por capturar la renta económica en minería se realiza a través de distintos impuestos, destacando los royalties específicos, royalties *ad valorem*, impuestos sobre las utilidades y los impuestos sobre la renta del recurso.

En primer lugar, los royalties específicos se determinan en función de una cantidad física (no financiera), es decir, como pago según producción de una compañía. Generalmente estos impuestos deben corregirse con el tiempo, pues no dan cuenta de los cambios en el sistema de precios. Por otro lado, los impuestos *ad valorem* corresponden a una tasa sobre el precio de venta que enfrenta la empresa extractiva, siendo éstos sobre una base financiera que se modifica con los movimientos del precio.

Los regímenes de impuestos sobre las utilidades actúan sobre la renta económica, pero no están diseñados específicamente para el sector minero. Esto se debe a que la utilidad generada se descompone en dos partes, el nivel normal de utilidad y la renta económica. En el caso de que una empresa no declare utilidades, se puede mezclar este tipo de impuestos con uno de tipo *ad valorem* o específico, que permiten obtener ingresos fiscales aun cuando la empresa no declare utilidades, lo que podría considerarse como un sistema híbrido.

Por último, los impuestos sobre la renta del recurso son aquellos que apuntan a identificar la renta económica por medio de la deducción de todos los costos de producción desde los ingresos, incluyendo el nivel normal de utilidad y tomando la parte correspondiente a la renta. El mayor problema de esta modalidad radica en la determinación de la tasa normal de utilidad.

En el diseño de una adecuada política tributaria, existen distintos principios bien definidos. Ellos corresponden a la búsqueda de eficiencia económica, equidad, bajo costo administrativo, transparencia hacia los distintos agentes y estabilidad del flujo fiscal (Harman y Guj 2006).

El concepto asociado a la eficiencia económica quiere decir que la recolección de renta por parte del gobierno no tenga impacto en la exploración y producción de las actividades mineras. Esta es la condición de neutralidad, es decir, que el impuesto no cambie el comportamiento o la toma de decisiones en una firma. La idea de neutralidad se encuentra asociada a los conceptos de eficiencia y no distorsionante. La eficiencia

hace relación a la eficiencia en la utilización de recursos, pues el impuesto no cambia la forma en que se utilizan los factores de producción en relación al uso que les da el mercado sin ninguna intervención. Alguna falla en el cumplimiento de la neutralidad, eficiencia o distorsión, llevará que las tasas de extracción sean menores o mayores a lo socialmente óptimo.

La equidad del impuesto busca en primer lugar asociar que el pago del impuesto sea justo para aquellos que lo pagan. Así, en primer lugar el impuesto debe ser común en un nivel horizontal. Esto quiere decir que existe un trato equivalente para todas aquellas mineras que producen la misma cantidad de renta económica, cobrando un mismo impuesto. Por otro lado, la equidad vertical se relaciona con la capacidad de discernir entre aquellas que generan mayor o menor renta económica.

Otras consideraciones sobre la equidad son dadas por la manera en que se reparten las recaudaciones, haciendo partícipes a las comunidades o gobiernos locales y no solamente al gobierno central. También se destaca la equidad intergeneracional, pues como se ha destacado previamente, esta corresponde a una importante falla de mercado asociada al agotamiento de los minerales. Bajo este concepto cobra relevancia la idea de sustentabilidad económica, que de alguna manera permita la inversión en activos que generen valor para las nuevas generaciones.

En términos analíticos, se ha presentado un modelo que permite determinar la tasa impositiva óptima para un mineral, dependiendo de la planificación que se tenga o se quiera de un determinado recurso mineral. En particular, el modelo propuesto por los autores Dasgupta, Heal y Stiglitz en su trabajo "*The Taxation of Exhaustible Resources*", indica que si el gobierno desea generar una determinada planificación en la utilización de un recurso lo puede lograr a través de una política tributaria. La ecuación (17.1) muestra el resultado de los autores, considerando un impuesto  $\tau$  sobre el margen de utilidades, considerando un mercado competitivo en el cual el margen de utilidad debe crecer a la tasa de interés, mientras que (17.2) exhibe el planteamiento de la ecuación diferencial de (17.1)<sup>4</sup>:

$$\frac{d \ln(p \cdot (1 - \tau + \alpha \cdot \tau) - c \cdot (1 - \tau))}{dt} = \rho \quad (17.1)$$

---

<sup>4</sup> Un mayor desarrollo de este estudio se puede encontrar en el estudio de Dasgupta, Heal y Stiglitz. *The Taxation of Exhaustible Resources*. Working Paper Series, Cambridge: National Bureau of Economic Research, 1980.

$$\dot{p} = \rho \cdot \left[ p - \frac{c \cdot (1 - \tau)}{1 - \tau + \alpha \cdot \tau} \right] + \frac{p \cdot (\dot{t} \cdot (1 - \alpha) - \dot{\alpha} \cdot \tau) - c \cdot \dot{t}}{1 - \tau \cdot (1 - \alpha)} \quad (17.2)$$

Donde  $\rho$  corresponde a la tasa de descuento utilizada (tomada de forma constante),  $p$  al precio del producto considerado y  $c$  a los costos marginales de extracción. Los valores de  $\{\alpha(t), \tau(t)\}$  dan cuenta de la extracción del recurso mineral y de la tasa impositiva en cada período, respectivamente. El término  $\alpha$  corresponde al porcentaje de deducción impositiva por el agotamiento del mineral (Dasgupta, Heal y Stiglitz 1980).

El término  $\alpha$  se denomina porcentaje de agotamiento, el cual es un concepto contable que se utiliza en el sistema de impuestos internos de E.E.U.U. (IRS) con el mismo efecto que genera la depreciación de activos. Así, para los depósitos naturales, el porcentaje de los ingresos brutos que se puede deducir depende del mineral existente:

**Tabla 1 Porcentaje de agotamiento por fuente mineralógica. Fuente: [www.irs.gov](http://www.irs.gov)**

<b>Depósito mineral</b>	<b>Tasa</b>
Azufre, uranio, asbestos, minerales plomo, zinc o níquel y micas.	22%
Oro, plata, mineral de hierro y pizarras bituminosas.	15%
Bórax, granito, caliza, mármol, conchas de crustáceos, potasio, talco y dióxido de carbono de pozos.	14%
Carbón y sal (cloruro de sodio).	10%
Arcillas y pizarras para cañerías de drenaje o ladrillos.	7,5%
Arcillas para elaboración de baldosas, tejas, cerámicas. Arenas, gravas y piedras (no ornamentales)	5%

### **2.6.2. Existencia de inventarios estratégicos**

La utilización de inventarios estratégicos por parte de los distintos países se ha dado principalmente por el lado de la demanda, es decir, por parte de las naciones consumidoras para asegurar la utilización de commodities en sus procesos productivos y permitir una estabilidad del precio en un futuro de mayor volatilidad o escasez.

El rol del gobierno en el proceso de generar y mantener inventarios se vuelve destacable. La situación se explica en contraposición a dejar a los especuladores dominar los inventarios: existen altos riesgos en la especulación, especialmente si las economías de escala hacen que los inventarios pequeños sean impracticables, lo cual limitaría a los privados a llevar un stock óptimo (Nichols y Zeckhauser 1977).

Para los productores, la acumulación de inventarios se relaciona mayoritariamente con crear una situación de escasez y poder controlar los precios, es decir, el objetivo se da para generar fallas de mercado y no aumentar la eficiencia en la utilización de los recursos naturales. Por otro lado, los consumidores basan su estrategia en acumular inventarios en épocas de caídas de precio, lo que involucra riesgo financiero y el hecho

de mantener capital ocioso. Esta situación hace que la estrategia de inventarios sea posible en largas corporaciones o por los estados (Hamilton 1944).

En términos generales, la necesidad de estabilizar los precios de los commodities a través de inventarios, proviene que éstos no se mueven en mercados perfectamente competitivos. Se establece además que en presencia de un mercado competitivo, Pareto eficiente, en ausencia de riesgo y con buen desarrollo de mercados futuros, los inventarios se limitan al trabajo realizado por los especuladores en el plazo inmediato (Newbery y Stiglitz 1982).

### **2.6.3. Desarrollo de políticas industriales**

Las alternativas previamente mencionadas, relacionadas con el desarrollo impositivo o estratégico, demuestran el enorme potencial existente para los Estados por generar mayor valor social y complementar problemas inherentes al sistema de intercambio utilizado. De este modo, una política industrial se trata en la actualidad como la decisión racional de parte del aparato público por generar una mayor competitividad o desarrollo en una industria determinada.

El fundamento intrínseco para permitir la existencia de una política industrial se da por la presencia de externalidades ampliamente generadas en los mercados, agrupadas entre aquellas de coordinación y de información. Junto a esto, se presenta el hecho que el crecimiento económico por medio de la diversificación en la producción nacional no es un proceso directo y natural, por lo cual se ha dado históricamente que las acciones de diferenciación provengan directamente del Estado (Rodrik 2004).

La falla de información imperante en el desarrollo de políticas industriales se da en el desconocimiento de los costos que puede significar una nueva industria en el país. Esta situación significa una barrera para el emprendimiento, que ante tal incertidumbre inhibirá la posibilidad de incorporarse a un nuevo sector industrial. Junto a lo anterior, se dan los llamados costos de descubrimiento, que explica que cualquier emprendimiento en un nuevo ámbito posee un costo social menor al privado, por el hecho de que un resultado positivo permite que se presenten más interesados en desarrollar un nuevo negocio. Por otro lado, el costo del fracaso no es compartido y se asumiría completamente por el emprendedor.

En este punto nace una posibilidad implementada ampliamente por varios países del mundo, destacando el caso de China, la cual consiste en generar barreras a las exportaciones (en forma de restricciones o carga impositiva especial), que incentivan el autodescubrimiento y la utilización de la materia prima por parte de los países productores. Esta situación debe ser tratada de manera cuidadosa, recordando que los

organismos internacionales pueden llegar a condenar este tipo de iniciativas y en teoría llegar a castigos comerciales ante los países (Korinek y Kim 2010).

En lo que respecta al caso especial del molibdeno, China ha buscado potenciar este sector. De esta manera, el país ha establecido un impuesto a las exportaciones de 15%, lo que genera un doble sistema de precios que le permite mayor competitividad a las productoras chinas. Además, el sistema produce que algunos productos sean procesados de mayor manera sólo para evitar los impuestos respectivos y son transados a precios menores a los del material en bruto (como scrap o pellets) (OECD 2009).

En la teoría se plasma que la mejor manera de corregir las fallas de información de un mercado, en términos de eficiencia económica, se da mediante la entrega de subsidios. No obstante, la labor se complica al tener un sistema de monitoreo adecuado, pues las apuestas de “capital semilla” deben estar constantemente revisadas y apoyadas, para evitar el comportamiento oportunista y no permitir que alguna actividad altamente prometedora se pierda en la burocracia.

En el segundo grupo de externalidades se encuentran aquellas de coordinación, tal es el caso de los proyectos que requieran grandes inversiones simultáneas, como por ejemplo infraestructura, electricidad, logística o transporte. Estas inversiones van asociadas a un alto costo fijo del capital, por lo cual los privados entran solamente en caso de existir la suficiente demanda. El concepto tras el fallo de coordinación es que cada actividad resulta beneficiosa socialmente; pero el hecho de limitar la visión a cada mercado por parte de los emprendedores los inhibe de notar los beneficios que trae su empresa hacia el resto. Aquí la capacidad estatal de corregir se basa en permitir la negociación o coordinación directa entre los agentes.

En general ambas maneras de generar políticas industriales en un país nacen de situaciones correctivas que aseguran la estabilidad del sistema económico. Sin embargo, varias situaciones exitosas en materia de crecimiento y políticas industriales guiadas por el Estado se han dado por la convicción del desarrollo de capital humano. Estos ejemplos de ganadores en un ambiente desconocido se han dado principalmente en países asiáticos, como Japón, Corea del Sur o Taiwán. Tales casos son destacables, por tratarse de naciones de una riqueza natural relativamente baja, por lo cual se vieron envueltos en una estrategia de crecimiento de alta incertidumbre.

De este modo se da cuenta que no existe una receta única ni válida para todas las naciones para desarrollar una política industrial. No obstante, existen características homólogas para generar medidas exitosas. En este ámbito se destaca el hecho de que la política desarrollada posea el liderazgo de un alto mando política, que demuestre



compromiso y responsabilidades. También debe darse la coordinación de todos los agentes económicos que se vean involucrados en el proceso, junto a esto, la transparencia en términos financieros y de compromisos es una necesidad imperante en una sociedad empoderada.

Finalmente, se debe dar cuenta de la visión contraria a la existencia de las políticas industriales. Estos enfoques intentan mostrar que las economías deben basarse en el desarrollo de las exportaciones y de incorporar inversión extranjera. No obstante, a pesar de que las industrias exportadoras se muestren más productivas y dinámicas en un país, esta situación no está relacionada completamente al hecho de que sean exportadoras (Rodrik 2004). Además, la posibilidad de inversión extranjera no da cuenta de los problemas de distribución que se dan por el envío de ingresos de países pobres hacia accionistas de países ricos.

### 3. Metodología

Para cumplir el objetivo planteado previamente se propone la siguiente metodología de trabajo: en primer lugar realizar la caracterización de la industria del molibdeno, para luego dar paso al planteamiento de un modelo sobre agotamiento de molibdeno en Chile, que se base en una optimización dinámica de los recursos extraídos. Finalmente, se analizarán las distintas políticas públicas que se pueden ejercer en Chile para llegar a mayores niveles de utilización de los recursos provenientes del molibdeno extraído. La siguiente figura ilustra la secuencia de trabajo:

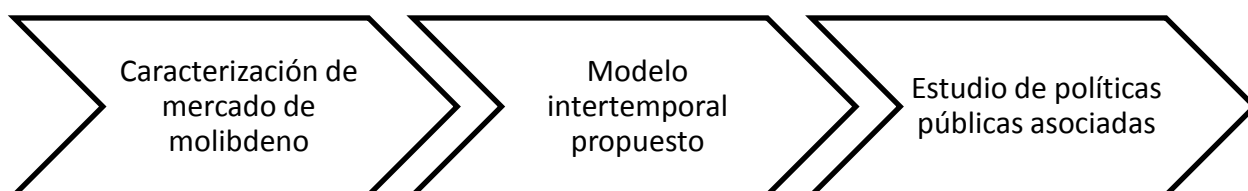
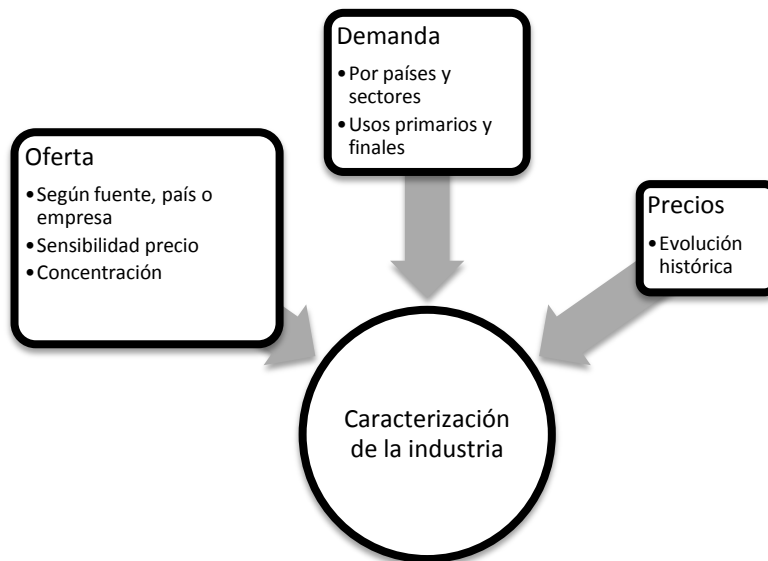


Figura 11 Esquema de trabajo propuesto para validar utilización de molibdeno en el país.

#### 3.1. Sección de caracterización de la industria

La sección sobre la caracterización de la industria del molibdeno pretende otorgar las herramientas iniciales para comprender el movimiento e importancia de esta industria. Para ello se indican las propiedades del molibdeno que justifican los usos que tiene éste en la economía actual, junto a sus distintos procesos de extracción del mineral desde el yacimiento y los procesos metalúrgicos para su obtención de un producto comercializable. Los puntos relevantes a realizar se resumen en la figura siguiente:



**Figura 12 Esquema de trabajo para caracterizar el mercado del molibdeno.**

### **3.1.1. Demanda**

El estudio de demanda se centra en mostrar los principales usos y propiedades del molibdeno. Además, se estudiarán las principales regiones del mundo consumidores del metal, apreciando su nivel de consumo en el período 2011. Junto a la información anterior se destacarán los usos primarios y finales del molibdeno, que dan cuenta del nivel de especialización del mercado. Luego se define la posición de Chile como una demanda derivada y consumidor intermedio de molibdeno, a través de los datos de importación de aduanas de concentrado de molibdenita.

Así, la sección se centra en mostrar los distintos mercados en los cuáles se comercializan los productos de molibdeno. El análisis de los sectores económicos y regionales más importantes entrega la visión necesaria sobre las oportunidades de negocio para Chile en el mercado internacional. La importancia chilena se manifiesta a través de los datos de importaciones (aduanas), lo que permite ver la capacidad de la industria de procesamiento del mineral en el país y su importancia en el comercio de productos de uso primario.

### **3.1.2. Oferta**

La sección de oferta comprende la información recopilada por la base de datos Raw Material, sobre producción minera. La sección busca caracterizar la oferta de molibdeno de mina como mineral principal y (en mayor medida) como sub producto. Se muestran las fuentes de operación y de la naturaleza de la extracción desde el período que la base de datos tiene información actualizada (desde el año 1984 al 2011). Luego se determinan indicadores de elasticidad de la oferta de corto plazo del molibdeno como

subproducto, lo que da cuenta de su dependencia sobre su propio precio y del metal principal. Junto a esto, se mencionan las etapas de procesamiento del molibdeno y los distintos productos comercializables que se pueden generar. Finalmente se realiza el estudio de la oferta por países, indican los mayores productores mundiales y su grado de concentración (tanto geográfica como por empresas) y los nuevos proyectos de producción de molibdeno. Se destaca específicamente la producción chilena, con los principales actores en la industria extractiva nacional.

### 3.1.3. Precios históricos

La sección muestra la evolución que ha tenido el precio del molibdeno a lo largo de su historia, mostrando los principales hitos que han marcado la pauta en su comportamiento.

## 3.2. Sección de modelo de agotamiento

En esta sección se plantea inicialmente el modelo de agotamiento a utilizar. El modelo consta de una función a optimizar, representada por el valor presente de los flujos futuros de la utilidad neta generada por la extracción del molibdeno en el país y la recuperación del mineral de molibdenita desde las operaciones existentes. El modelo incluye además otra componente que referencia al costo de oportunidad de vender o no una cierta cantidad en un determinado período. De este modo, se calcula el camino óptimo de ventas de productos de molibdeno desde el punto de vista chileno, tomando como dato los precios históricos del producto comercializable del concentrado de molibdeno y la información sobre extracción recopilada en el capítulo anterior. La siguiente figura muestra el proceso de trabajo para la sección:

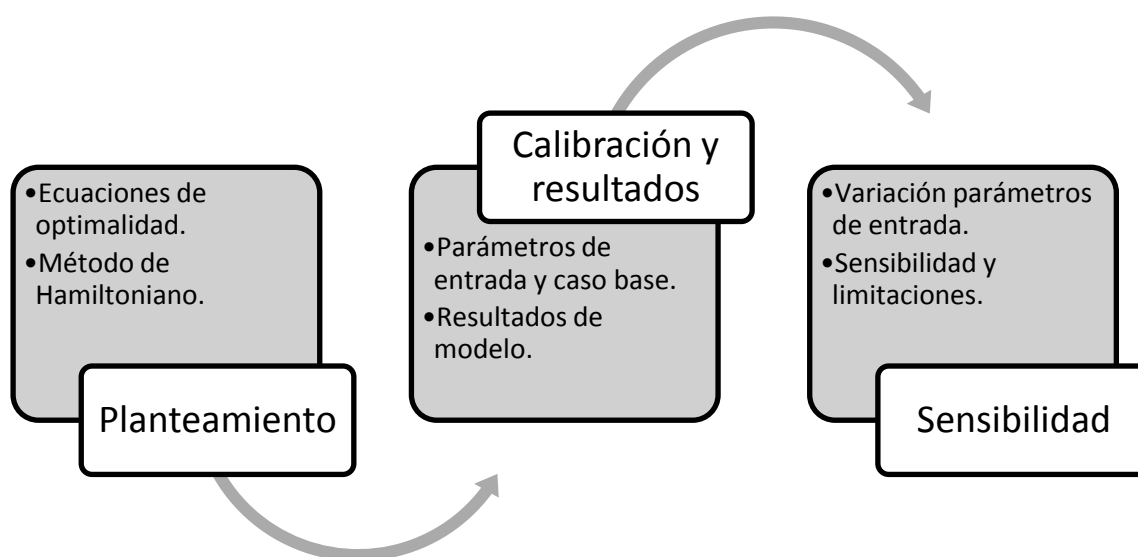


Figura 13 Proceso de trabajo para sección de modelo de agotamiento.

### 3.2.1. Planteamiento

El planteamiento matemático del problema se inicia con la función que define los flujos anuales de molibdeno. En este caso el beneficio proviene de la venta de molibdeno, que puede provenir del material extraído de la mina o de aquel presente en el inventario, y se deben deducir los costos de procesamientos necesarios para su comercialización.

Dentro del flujo anual deben definirse los costos relevantes a estudiar, los que corresponden al costo de oportunidad económico de mantener un material guardado y no venderlo y el costo físico de mantener un stock de un producto. Se debe modelar considerando el caso de Chile, donde el molibdeno es extraído como sub producto, por lo cual no se le atribuyen costos de extracción. Las variables de decisión provienen de la cantidad extraída y puesta en stock, junto con aquella proveniente del stock y colocada en venta. Las restricciones impuestas se relacionan con aquellas de variación de stock, naturaleza de las variables y de transversalidad del problema de optimización.

Luego de definir la función de beneficios se realizan las ecuaciones de optimización dinámica del Hamiltoniano, que entregan las relaciones que se deben cumplir sobre el óptimo intertemporal.

### 3.2.2. Calibración y resultados

La etapa de calibración consiste en definir los parámetros base con lo cuáles se determinará el caso base de comparación, el cual se trata como un caso con una restricción de capacidad de inventario igual a cero, es decir, replicar la situación original del país.

Los parámetros que se deben definir en esta etapa corresponden a los siguientes:

Tabla 2 Parámetros a definir para calibración del modelo

Parámetro	Unidad
Tasa de descuento	%
Costo medio stock	USD/ton
Costo procesamiento molibdenita	USD/Kg Mo
Costo venta concentrado	USD/Kg Mo
Ley Mo en concentrado	%
Capacidad de inventario	Ton Mo

La manera de definir cada parámetro proviene principalmente de información recopilada en la industria o de la literatura existente.

Una vez definidos los parámetros de entrada se establece la situación del caso base, considerando una capacidad de inventario igual a cero, lo que entregará como resultado de la evaluación la línea de comparación, pues se trataría de lo que fue realizado con la producción en el período evaluado.

Así, con los parámetros iniciales y el caso base definido se procede a la evaluación de los resultados del modelo que entregan el camino óptimo de utilización.

### **3.2.3. Análisis de sensibilidad**

Luego de generar los resultados se realiza la sensibilidad del modelo en base a sus parámetros de entrada, que permiten apreciar el impacto que tiene la modificación de las variables en los resultados del trabajo y también los límites de aplicabilidad del modelo.

La sensibilización se realiza en los siguientes parámetros, con variaciones de hasta un 50% en su valor definido en el caso base:

**Tabla 3 Parámetros a definir para realización de análisis de sensibilidad**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>
<b>Tasa de descuento</b>	%
<b>Costo medio stock</b>	USD/ton
<b>Costo procesamiento molibdenita</b>	USD/Kg Mo
<b>Costo venta concentrado</b>	USD/Kg Mo
<b>Capacidad máxima inventario</b>	Ton Mo

Una vez que se ha definido la trayectoria óptima correspondiente a la utilización de los recursos de molibdeno, se plantea un esquema de tributación, que busca generar a través de incentivos impositivos un camino cercano a los resultados anteriores. Aquí el modelo utilizado corresponde al planteado en los antecedentes sobre políticas públicas en economía de minerales del punto anterior.

## **3.3. Sección de estudio de políticas públicas**

### **3.3.1. Tributación**

La caracterización de mercado para el molibdeno junto a la óptima utilización de los recursos de molibdeno en Chile permite generar el marco de trabajo para la implementación o estudio de distintas políticas públicas que pueden ser llevadas a cabo en el país. El estudio destaca una de las principales vías de políticas asociadas a los minerales, como es la posibilidad de mantener un régimen impositivo diferenciado a otras actividades económicas, que se justifica en las características propias de los

minerales, como su agotamiento y mantención de rentas económicas durante largos períodos de tiempo.

Esta sección se estudia el potencial que tendría la implementación de un modelo impositivo según se presentó en los antecedentes. Junto al modelo anterior se analiza el efecto de un impuesto sobre la renta económica que ha generado el molibdeno. Se debe destacar que el análisis no se vinculará a un equilibrio general, por encontrarse fuera de los objetivos del trabajo.

### **3.3.2. Inventarios**

Otra posibilidad analizada y que se vuelve altamente significativa para las distintas naciones, corresponde a la capacidad de mantener inventarios estratégicos, los cuales se han desarrollado en distintas economías con distintos fines y en particular pueden ser una alternativa destacable a la hora de estudiar la producción y comercialización del molibdeno en Chile.

En esta sección se discuten los efectos de la política de inventarios que resulta como resultado del capítulo anterior, destacando los potenciales beneficios, barreras y limitaciones que se pueden generar por la alternativa.

### **3.3.3. Política industrial**

Finalmente, se destacan otras alternativas de política industrial que pueden ser impulsadas por nuestro país. De este modo, se analizan nuevas propuestas para enfocar una nueva mirada en lo que respecta a la utilización de los productos de molibdeno, destacando la presencia de Chile en el mercado mundial y el potencial que posee en la generación de bienes con mayor valor agregado, promoviendo la industrialización y la sustentabilidad económica y social de la minería.

## **4. Caracterización de la industria del molibdeno**

La siguiente sección entrega una visión general para comprender la relevancia del molibdeno a nivel mundial. Para lograr esto, se indican las distintas propiedades físico – químicas del metal que generan la utilización o demanda derivada asociada a los principales usos primarios y finales. Junto a esta información, se realiza un estudio sobre los procesos de extracción del mineral de molibdeno, reconociendo las menas relevantes, los tipos de depósitos y la metodología de extracción minera utilizada en los distintos yacimientos.

Luego, la comprensión sobre la industria del molibdeno requiere el estudio sobre el procesamiento de los minerales que contienen este metal, lo cual enmarca la manera

de obtener los distintos productos comercializables. Así, se recrea la noción sobre el nivel de industrialización requerido para generar valor.

## 4.1. Demanda del molibdeno

### 4.1.1. Propiedades y usos del molibdeno

El molibdeno corresponde a un metal de transición, cuyo nombre proviene del griego *molybdos* (parecido al plomo), en referencia a su aspecto gris oscuro. El molibdeno presenta en estado puro un color blanco plateado. Los principales usos de este metal en la actualidad se dan en aleaciones de acero, otorgándole mayores características contra la corrosión o dureza. Estos atributos provienen del mismo molibdeno, el cual destaca por su durabilidad, resistencia a la corrosión y alto punto de fusión:

Tabla 4 Propiedades físico - químicas del molibdeno

<b>Número atómico</b>	42
<b>Masa atómica [g/mol]</b>	95,94
<b>Densidad [g/ml]</b>	10,28
<b>Punto de ebullición [°C]</b>	4.639
<b>Punto de fusión [°C]</b>	2.623

Entre otros usos en los que destaca el molibdeno, se tiene la superaleación que se obtiene en base a níquel, para obtener catalizadores que se usan en la remoción de azufre en la industria petrolera. Además, también es utilizado en el proceso industrial de los lubricantes (el disulfuro de molibdeno es resistente a altas temperaturas, reduce el desgaste y la fricción de las piezas de los motores, como se puede dar en los frenos de los automóviles), en la fabricación de revestimientos y solventes, en la industria química (pigmentos para plásticos, pinturas y compuestos de caucho) y la electrónica (conductores eléctricos)<sup>5</sup>.

La siguiente figura ilustra los usos mencionados anteriormente:

---

<sup>5</sup> Fuente: <http://www.imoa.info/>

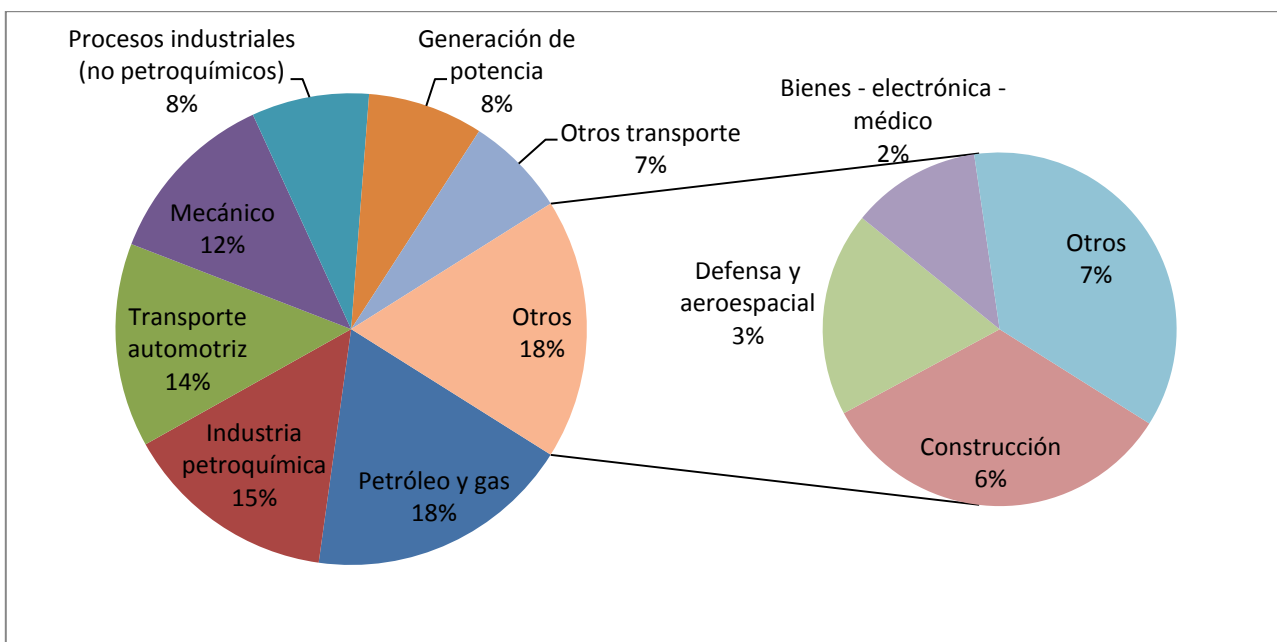


Figura 14 Consumo final de molibdeno (2011). Elaboración propia en base a información de Steel and Market Research (2011).

#### 4.1.2. Demanda regional

El molibdeno de origen mina se distribuye a través de todas las regiones del mundo, destacando la presencia asiática (incluyendo China) con un 50%.

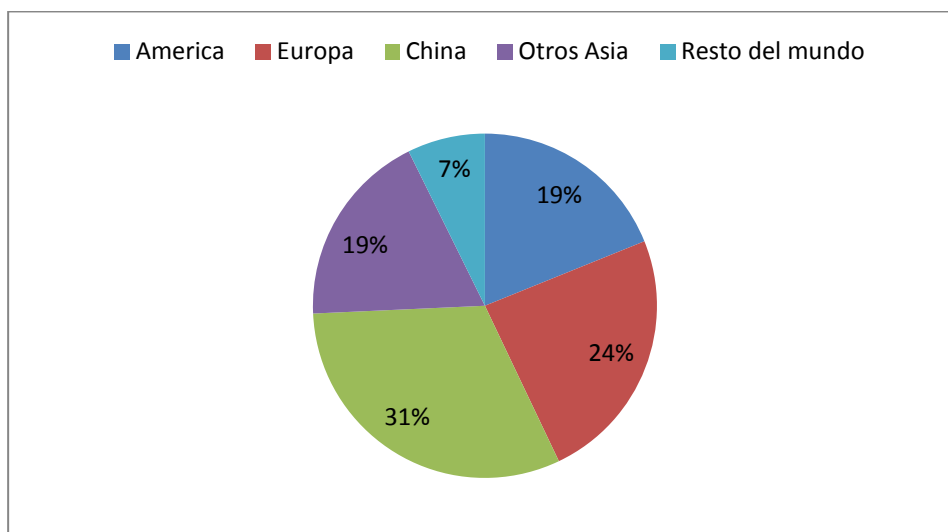


Figura 15 Consumo regional de molibdeno de mina. Fuente: Steel and Market Research (2011).

La información entregada muestra además que China y Europa son los consumidores más importantes de molibdeno tipo metalúrgico (aceros), molibdeno metálico y para



usos químicos. Lo cual se muestra en la siguiente figura (incluyendo consumo de molibdeno como chatarra):

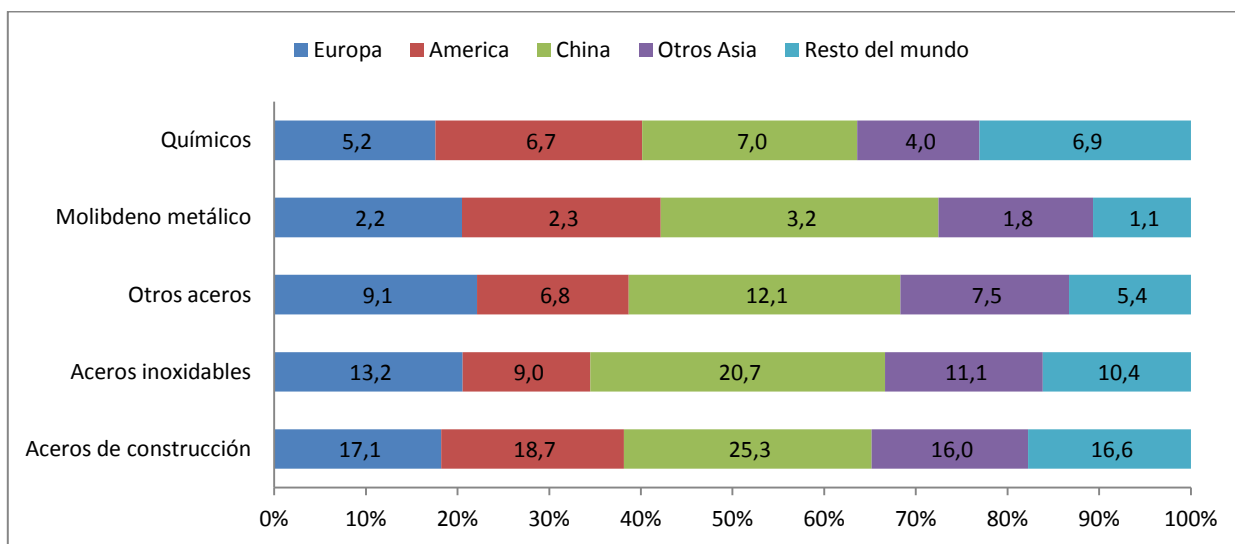


Figura 16 Distribución del consumo de molibdeno a nivel regional. Fuente: Steel and Market Research (2011).

#### 4.1.3. Demanda para usos primarios

La demanda de molibdeno queda ligada a los usos que se le dan a los productos de molibdeno, mayoritariamente ligados a las aleaciones en la fabricación de acero. En lo referente a sus aplicaciones, el molibdeno se separa entre usos primarios y usos finales.

En primer lugar, los usos primarios se diferencian aquellos de tipo metalúrgico (Aceros y aleaciones), molibdeno metálico y usos químicos. Según datos de Steel & Market Research 2011, la distribución para el uso primario se da de la siguiente manera:

Tabla 5 Usos primarios del molibdeno (2011)

Uso molibdeno	kton	Participación
Aceros de construcción	93,6	36%
Aceros inoxidables	64,4	25%
Otros aceros	58,7	23%
<b>Sub total metalúrgico</b>	<b>216,7</b>	<b>84%</b>
Molibdeno metálico	10,6	4%
Químicos	29,7	12%
<b>TOTAL</b>	<b>257,0</b>	<b>100%</b>

La distribución anterior considera el molibdeno utilizado proveniente de chatarra y aquel proveniente de mina a través de sus procesos de obtención.

Los datos destacan el eje central del mercado del molibdeno, que es su aplicación en la confección de aceros para otorgarle mejores características de durabilidad y corrosión. A pesar de encontrarse concentrado en su uso final, la demanda de molibdeno se caracteriza por su estabilidad, pues no posee sustitutos cercanos en este campo y el porcentaje en que se utilizado no supera el 10%, lo cual permite aplicar los conceptos relativos a demanda derivada e inelasticidad de la misma hacia el consumo de molibdeno.

Al excluir de la información anterior el molibdeno proveniente de chatarra, para dejar solamente aquel proveniente de mina, los datos se presentan con las siguientes variaciones:

**Tabla 6 Usos primarios del molibdeno proveniente de mina**

<b>Uso molibdeno</b>	<b>kton</b>	<b>Participación</b>
<b>Aceros de construcción</b>	86,1	40%
<b>Aceros inoxidables</b>	43,2	20%
<b>Otros aceros</b>	45,4	21%
<b>Sub total metalúrgico</b>	174,7	81%
<b>Molibdeno metálico</b>	10,6	5%
<b>Químicos</b>	29,7	14%
<b>TOTAL</b>	<b>215,0</b>	<b>100%</b>

De aquí se destaca que existe un campo único para el molibdeno de mina, pues los usos de molibdeno metálico y químico no permiten la utilización de chatarra. También se desprende que el uso primario con mayor porcentaje de utilización de chatarra corresponde a los aceros inoxidables, con un 33%. El total de chatarra utilizada en el mercado ascendió a 42,0 [kton], es decir, un 16% del total consumido.

#### **4.1.4. Demanda para usos finales**

El consumo de molibdeno por uso final se agrupa en diez campos principales, los cuales corresponden a la generación de potencia en base a petróleo y gas natural (PG), procesos industriales no petroquímicos (Industria no PQ), petróleo y gas, transporte automotriz, otros medios de transporte, industria petroquímica (IPQ), construcción, usos mecánicos, defensa y aeroespacial y bienes de consumo – electrónica – médica (E&M).

La información anterior sobre los usos finales del molibdeno se interrelaciona con el consumo del molibdeno primario, es decir, se construye la matriz que representa el total utilizado de cada uso primario en su uso final respectivo, lo que permite comprender la relación entre el productor primario y sus compradores finales.

Tabla 7 Consumo final del molibdeno (2011)

Kton	Construcción	Aceros inoxidables	Otros aceros	Mo metálico	Químicos	TOTAL
PG	13,4	4,3	2,0	0,6	0,0	20,4
Industria no PQ	3,1	8,4	8,1	1,2	0,0	20,7
Petróleo y gas	19,0	6,8	3,8	0,0	17,3	46,9
Automotriz	18,9	3,2	12,4	1,5	0,0	36,0
Otros transporte	12,1	2,4	3,1	0,2	0,0	17,8
IPQ	3,1	25,6	6,7	0,0	2,3	37,7
Construcción	0,5	12,4	2,0	0,3	0,0	15,3
Mecánico	18,5	0,7	11,1	1,2	0,0	31,6
Defensa	2,0	0,1	6,4	0,1	0,0	8,6
E&M	0,0	0,4	2,6	2,5	0,0	5,5
Otros	3,0	0,0	0,5	3,0	10,1	16,7
<b>TOTAL</b>	<b>93,7</b>	<b>64,3</b>	<b>58,6</b>	<b>10,6</b>	<b>29,7</b>	<b>257,0</b>

Los datos anteriores interpretan los objetivos de mercado para los productos primarios de molibdeno. Por ejemplo, los productos de molibdeno que se destinan de tipo químico (principalmente disulfuro de molibdeno refinado) se utiliza prácticamente solo en la industria de petróleo, como agente catalizador de las reacciones. La tabla anterior permite aclarar la forma en que se desenvuelve la demanda por molibdeno a nivel mundial.

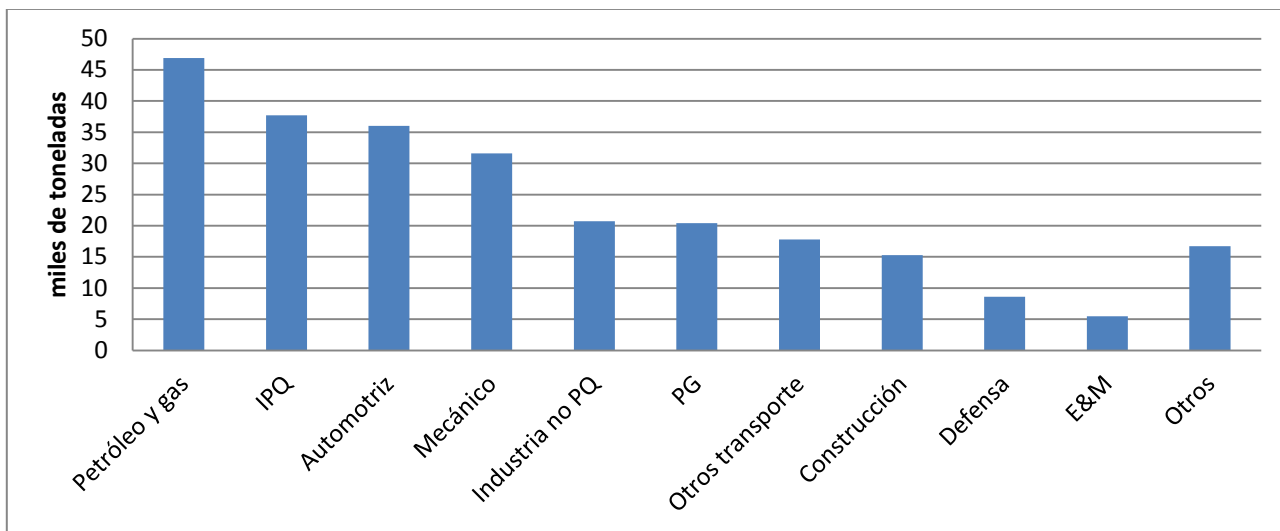


Figura 17 Consumo final de molibdeno (2011). Fuente: Steel and Market Research (2011).

En los usos finales definidos como otros se incluye el consumo para la elaboración de pigmentos, lubricantes y revestimientos.

#### 4.1.5. Chile como consumidor intermedio

Los antecedentes sobre la demanda del molibdeno no logran posicionar a Chile como un agente relevante en el consumo, no obstante, la importancia que posee el país en este tema se da como con un consumidor intermedio. Esta situación corresponde al hecho que Chile, presenta una capacidad instalada para tratar concentrados de molibdenita provenientes de otras regiones del mundo fuera del país, lo que posiciona a Chile en la región en términos de procesamiento del mineral.

Los datos presentes en el servicio nacional de aduanas dan cuenta de la cantidad de importaciones de concentrado de molibdeno, provenientes principalmente desde Perú, que llegan a Chile para realizar su tostación.

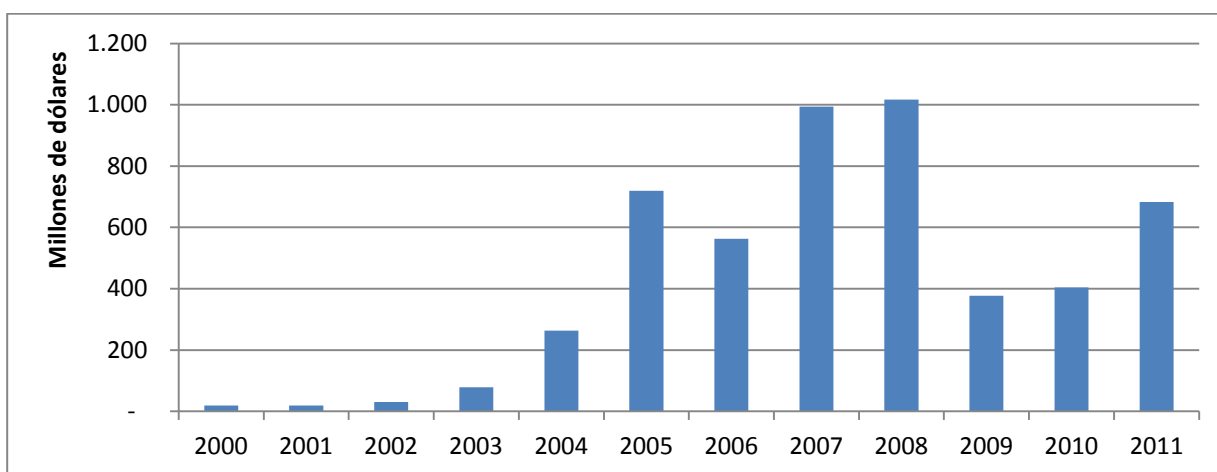
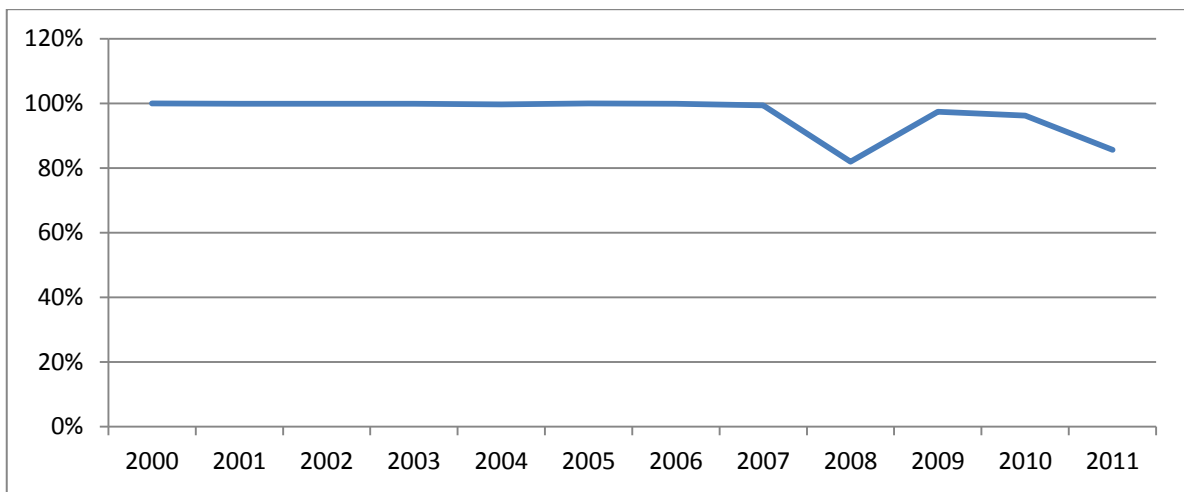


Figura 18 Importaciones chilenas de productos de molibdeno. Fuente: Servicio Nacional de Aduanas (2012).

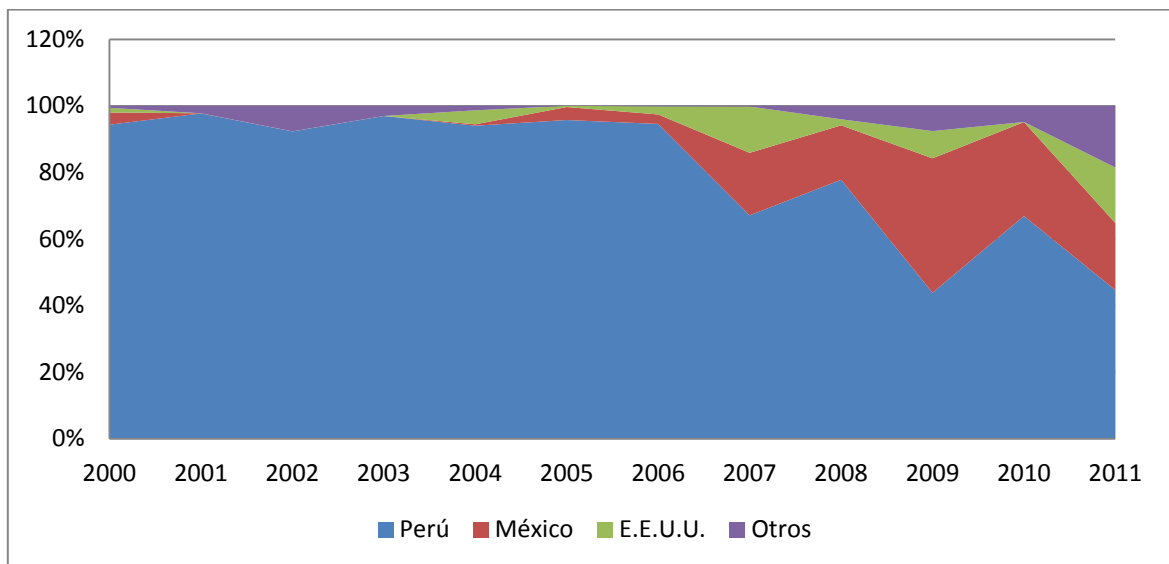
La importancia de las importaciones se basa al contrastar los datos con las exportaciones. Por ejemplo, el 2011 las exportaciones de molibdeno ascendieron a 2.000 millones de US\$ y las importaciones a casi 700 millones de US\$, es decir cerca de un tercio. Así, el país se muestra no sólo como un agente relevante en cuanto a reservas y producción vía mina de molibdeno, sino que también como un maquilador relevante que concentra la posesión del molibdeno a nivel regional.

Tal como se apreció en los datos de comercio, la empresa clave en este mercado corresponde a Molymet S.A. La empresa ha dominado a lo largo del período las importaciones, a pesar de una leve caída mostrada el año 2008.



**Figura 19 Participación de empresa Molymet S.A. en importaciones. Fuente: Servicio Nacional de Aduanas (2012).**

Tal como se mencionó anteriormente, el origen de las importaciones de molibdeno viene dado por la minería peruana, no obstante, en los últimos años se ha destacado la presencia de importaciones desde México.



**Figura 20 Origen de importaciones de productos de molibdeno. Fuente: Servicio Nacional de Aduanas (2012).**

En el campo “Otros” se destacan las importaciones desde Argentina y Canadá. De esta manera se ve la importancia chilena del molibdeno, no sólo como el tercer mayor productor a nivel mundial, sino como el destino regional de los productores de mina, quienes depositan en Chile parte de su producción. Dentro de este punto se destaca el valor del Renio, pues generalmente el maquilador obtiene el este subproducto contenido al tan sólo pagar por el concentrado de molibdeno, lo cual ha significado un

incentivo para promover proyectos propios de refinación del metal por parte de los productores cupríferos.<sup>6</sup>

## 4.2. Oferta del molibdeno

### 4.2.1. Extracción de minerales de molibdeno

La minería de los minerales de molibdeno destaca por la extracción de la principal mena de este metal, la molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ). Dadas sus características mineralógicas, la molibdenita se asocia en mayor medida a minerales sulfurados de cobre, destacando su presencia en los yacimientos tipo pórfidos. Debido a esta importante relación en los orígenes, el molibdeno se extrae en gran medida como un subproducto del cobre de estos yacimientos. Según la información entregada por el grupo Raw Materials, la extracción de molibdeno durante el año 2011 se produjo tanto de manera subterránea como a cielo abierto, destacando la extracción mediante rajo con el mayor porcentaje:

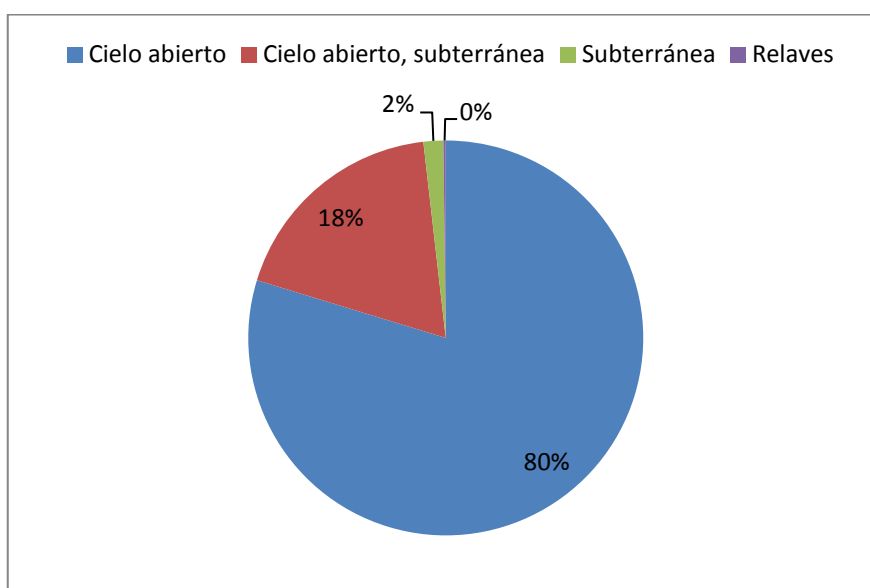


Figura 21 Extracción de molibdeno de mina global (2011). Elaboración propia en base a información de Raw Materials Database (2012).

A su vez, se presenta un formato de extracción por relaves que, por ejemplo, se da en Chile a través de la compañía Colihues, quien recupera molibdeno a través del tratamiento de relaves de cobre. Se debe destacar también la menor existencia de información por parte de las minas presentes en China, lo cual es explicado por la base

---

<sup>6</sup> Tal es el caso de Codelco, que ha impulsado recientemente el proyecto de un tostador de molibdenita, incorporando dentro de su importancia estratégica el Renio, que no era valorizado en sus ventas del molibdeno.

de datos como un sesgo por parte de las autoridades chinas en el acceso a la información sobre la minería de ese país.

El hecho de que la molibdenita se asocie a minerales de cobre ofrece una importante ventaja en cuanto a costos, tal como se ha mencionado en el capítulo sobre oferta de minerales en cuanto a subproductos se refiere. Así, durante las últimas tres décadas se muestra la composición de la producción de molibdeno, la cual se ha mostrado dominada por la producción como subproducto del cobre. No obstante, existe una caída considerable desde el año 2005, lo cual se explica por el brusco aumento del precio, que motivó una gran cantidad de proyectos mineros de molibdeno como producto principal. Esta situación da cuenta de la flexibilidad existente por parte de las minas productoras de molibdeno y su capacidad de apertura y cierre ante los movimientos del precio del metal.

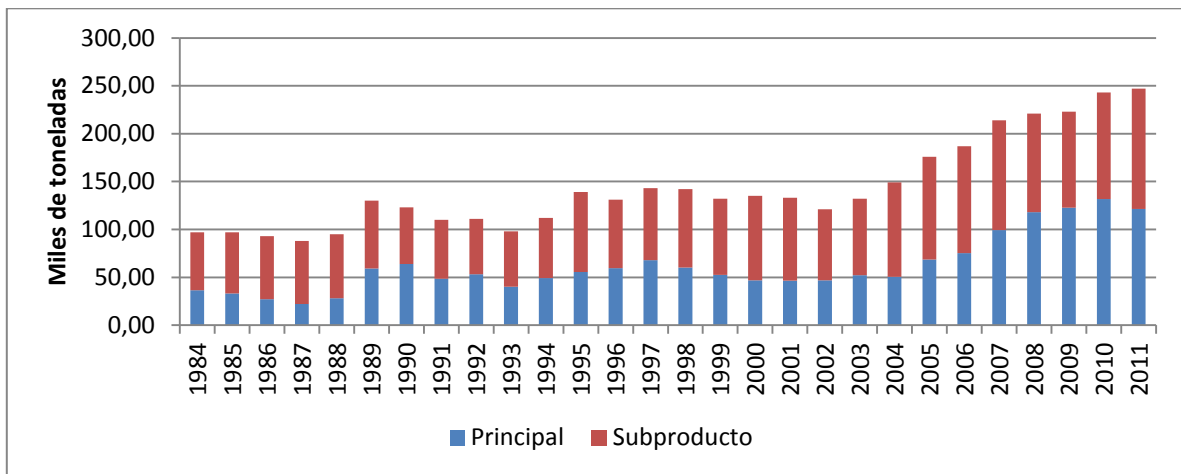
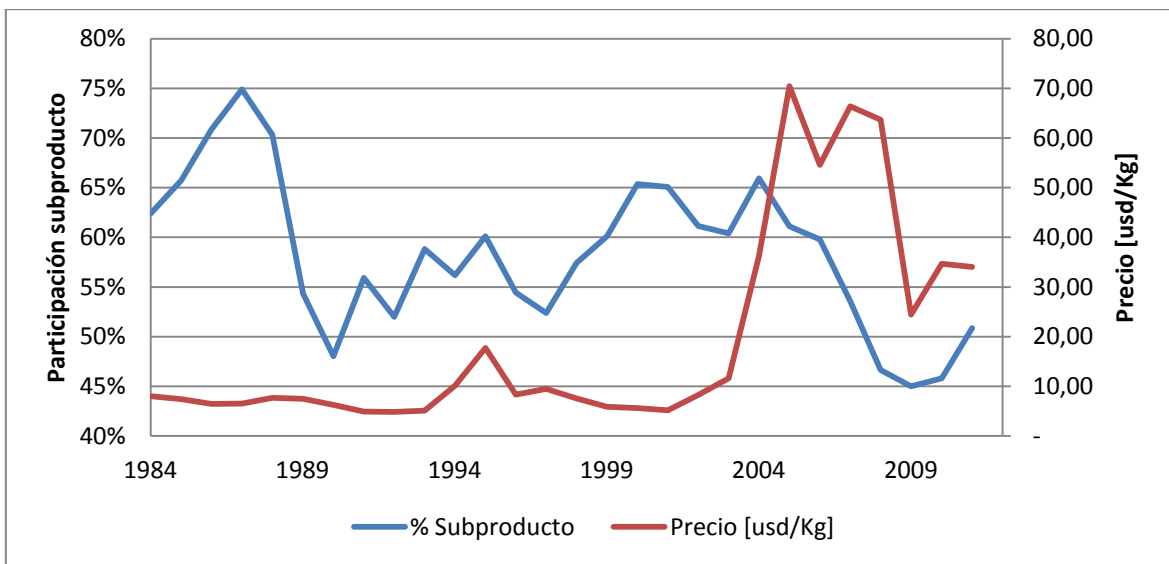


Figura 22 Producción de mina por fuente mineral a nivel global. Elaboración propia en base a información de Raw Materials Database (2012).



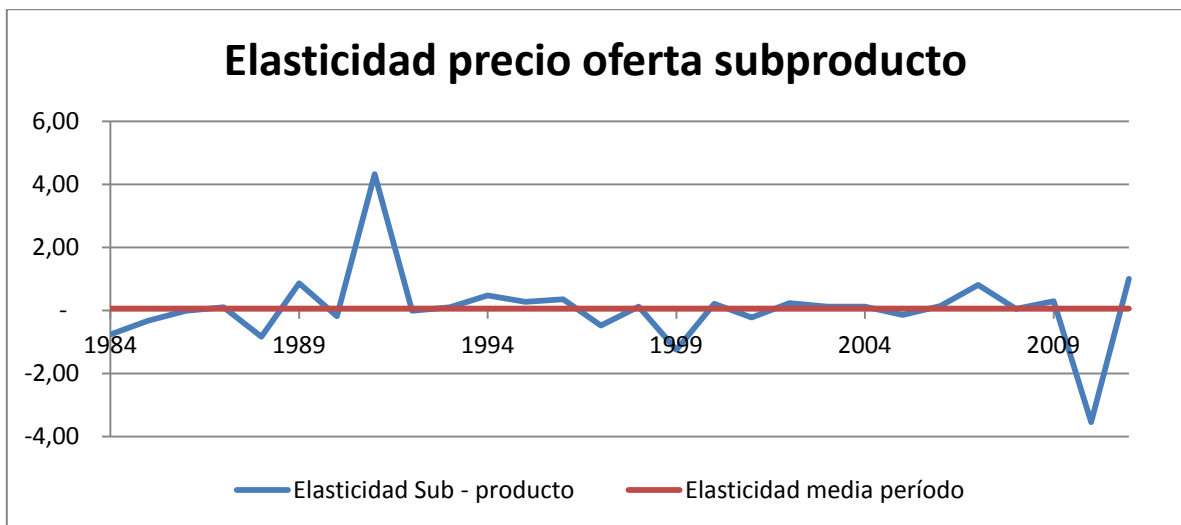
**Figura 23 Oferta mundial de molibdeno como subproducto y precio. Elaboración propia en base a información de Raw Materials Database (2012).**

Otra situación importante de destacar para el caso del molibdeno es la respuesta de la producción como subproducto ante variaciones en el precio, a modo de dar cuenta de la elasticidad de esta componente. Teóricamente, la oferta de subproductos se presenta de manera inelástica, debido a que la cantidad producida se determina por efecto del precio del metal principal, en este caso, del cobre.

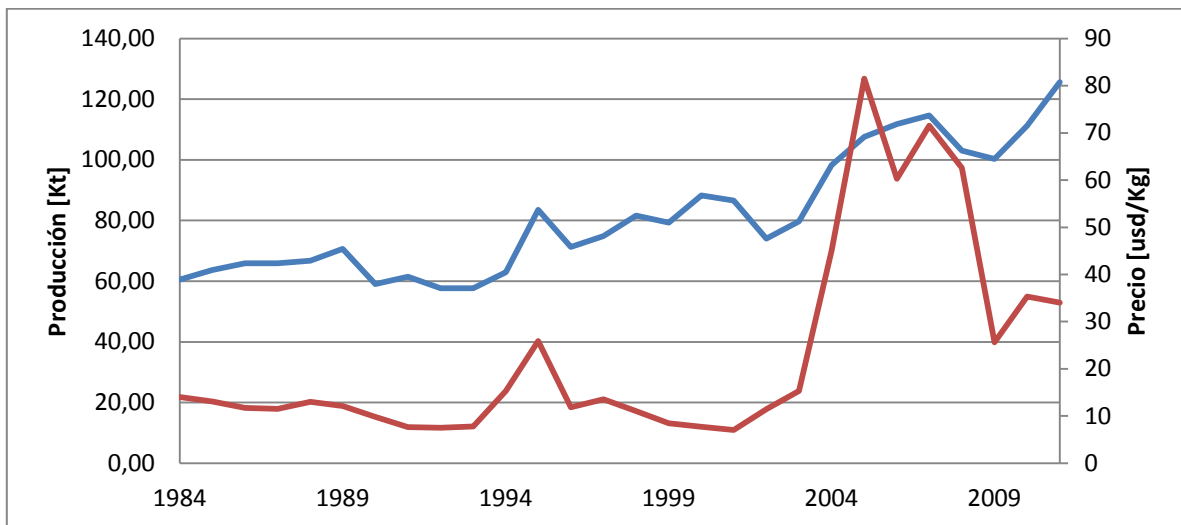
La elasticidad precio de la oferta por sub producto se determina a través de la razón entre la variación porcentual de la cantidad ofertada de molibdeno como subproducto y la variación porcentual del precio (real al año 2011). El anexo A.4 entrega un mayor desarrollo sobre este punto.

Al realizar el cálculo de la elasticidad precio de la oferta de subproducto, los datos muestran que de manera general, la oferta del metal como subproducto no se ve gobernada por los movimientos de precio del molibdeno, lo cual confirma la teoría en cuanto al comportamiento inelástico de la oferta de un sub – producto.



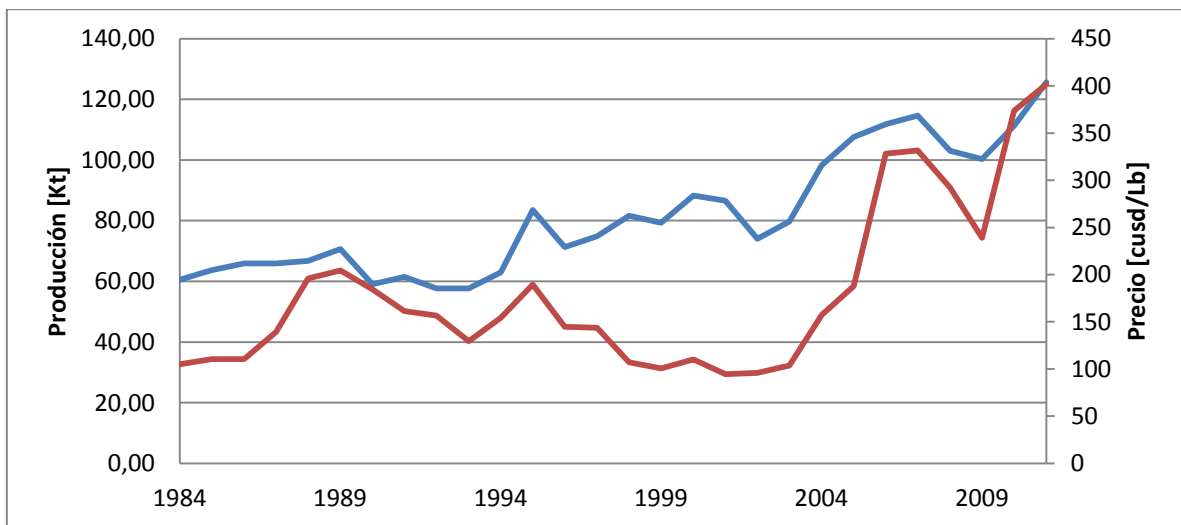


**Figura 24 Elasticidad corto plazo precio oferta del molibdeno como subproducto. Elaboración propia en base a información de Raw Materials Database (2012).**



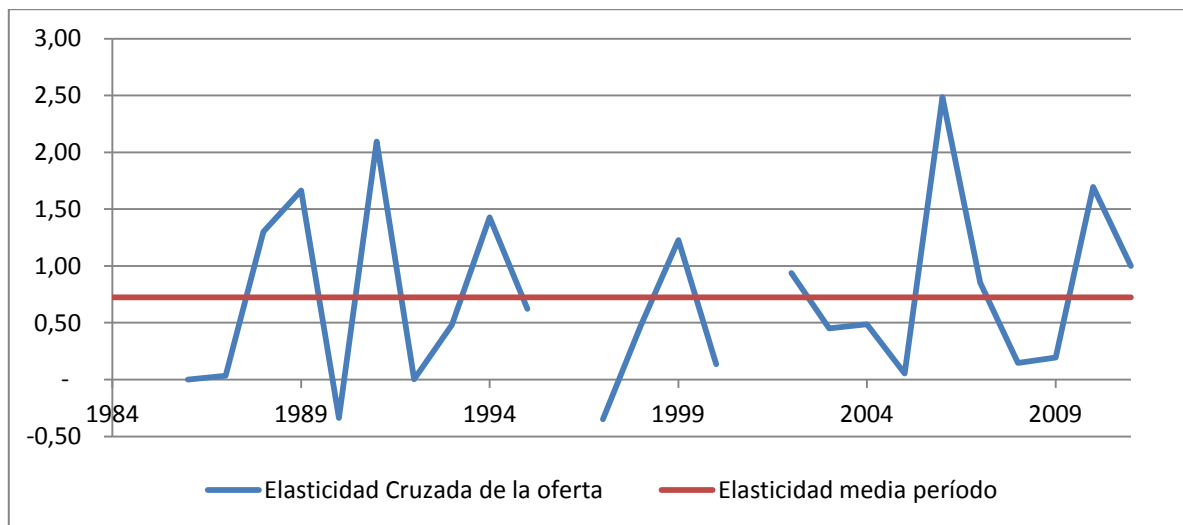
**Figura 25 Producción global de molibdeno como subproducto (línea azul) y precio del molibdeno (línea roja). Elaboración propia en base a información de Raw Materials Database (2012).**

Por otro lado, se puede apreciar que al comparar la producción de molibdeno como subproducto junto al precio del metal principal (cobre), se obtiene una mayor relación que en el caso anterior:



**Figura 26 Producción global de molibdeno como subproducto (línea azul) y precio del cobre (línea roja).  
Elaboración propia en base a información de Raw Materials Database (2012).**

Tal como se mencionaba, resulta relevante determinar la elasticidad cruzada de la oferta, que muestra la variación de la cantidad ofertada de molibdeno como subproducto ante variaciones del precio del cobre. Esta relación se vuelve más consistente que la anterior, al mostrar predominantemente valores positivos, que indica que aumentos en el precio del cobre se relacionan con aumentos en la cantidad ofertada a través del molibdeno como subproducto del cobre. El Figura mostrado no considera los datos de los años 1996 y 2001, los cuales corresponden a años la elasticidad se muestra con un valor negativo ajeno al orden de magnitud del resto del período (-6,61 y -11,45). Por un lado el año 1996 presenta una variación muy leve del precio, lo que genera el importante salto de este año y por otro lado, el año 2001 da cuenta de una brusca caída del precio del cobre que se ve acompañada por una baja en la producción de molibdeno como subproducto, pero no al año siguiente, sino que al subsiguiente.



**Figura 27 Elasticidad cruzada oferta molibdeno y precio del cobre. Elaboración propia en base a información de Raw Materials Database (2012).**

El trabajo anterior permite comprender la importante característica que tiene el molibdeno en cuanto a su producción, en donde la oferta del metal como subproducto ha dominado la mayor parte de la oferta y que además, el metal principal de las minas que producen el molibdeno como subproducto corresponde al cobre.

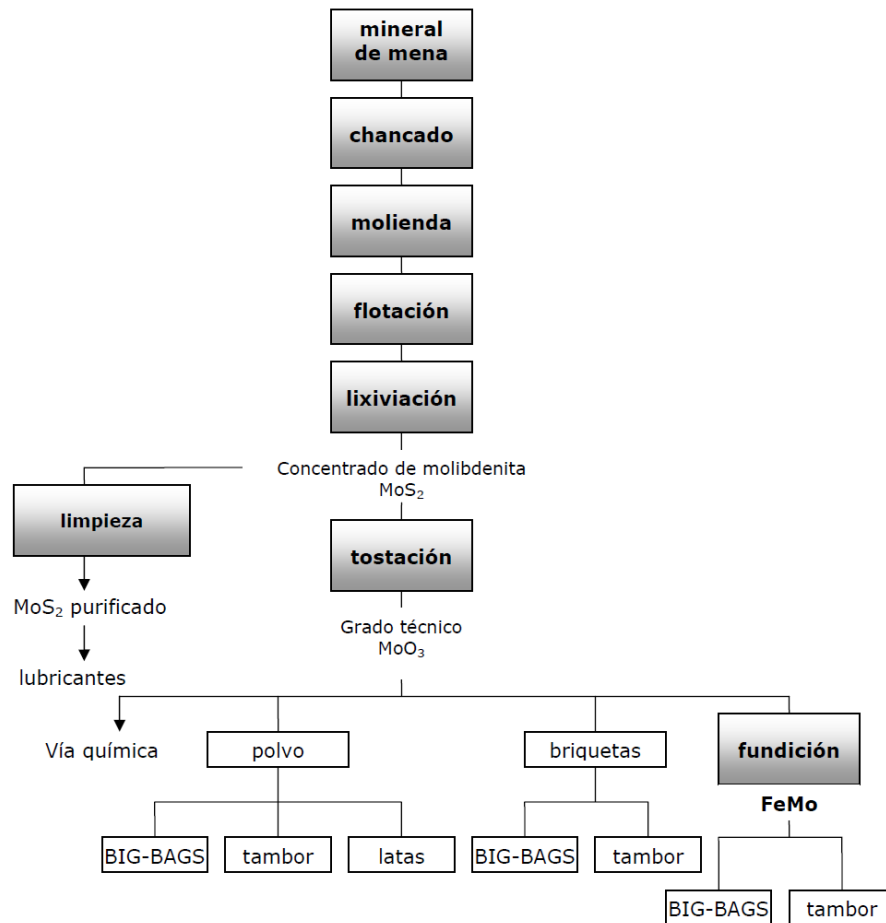
#### **4.2.2. Procesamiento de minerales de molibdeno**

La manera de conseguir el metal a partir de los minerales presentes en las rocas corresponde a una fuente de información relevante para comprender la manera en que se comportará la oferta del mismo. La situación se explica por la estandarización de los procesos (tecnologías existentes) y el costo de los insumos, es decir, las componentes que forman el costo del procesamiento metalúrgico y que indican directamente en el precio del producto final comercializable.

Para el caso del molibdeno, las etapas de procesamiento se pueden distinguir desde la extracción del mineral. En primer lugar y tal como se da en la mayor parte de los minerales sulfurados, es necesario atravesar distintas etapas de conminución, que permite la liberación de la molibdenita para concentrarse a través de un proceso de flotación. Para el caso de los minerales de molibdeno que se extraen de manera conjunta con los de cobre, es necesario realizar una flotación conjunta de ambos minerales para luego flotar selectivamente la molibdenita, que luego de una etapa de lixiviación de impurezas de cobre, se logra obtener el primer producto comercializable de este metal, que corresponde al concentrado de molibdenita, de aproximadamente 49% de molibdeno. Es hasta este punto hasta el cual llegan la mayor parte de los productores del molibdeno como subproducto, entregando el concentrado hasta una

compañía generalmente externa que se encarga del proceso siguiente de obtención del metal en alguna de sus formas necesarias para usos finales.

El proceso previamente mencionado se indica en el siguiente diagrama, que muestra el proceso que siguen los minerales de molibdeno que se encuentran en Chile, es decir, como sub producto del cobre:



**Figura 28** Etapas productivas de minerales de molibdeno. Fuente: “**Molibdeno**” Sutulov, Alexander.

Una vez que se genera el concentrado de molibdenita, el material pasa por distintos procesos metalúrgicos dependiendo del producto final a generar. A modo general, el concentrado puede pasar por dos vías de procesamiento: la tostación o la limpieza. El primer proceso se enfoca en la generación por vías pirometalúrgicas del trióxido de molibdeno ( $\text{MoO}_3$ ) para su utilización en aleaciones y la segunda vía permite la obtención de sulfuro de molibdeno para ser utilizado como lubricante ( $\text{MoS}_2$ ).

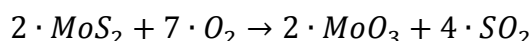
En la industria, el procesamiento del molibdeno es tratado como una vía estándar, replicable y de tecnología conocida, por lo cual su costo se ha mantenido constante

dado la invariabilidad del proceso metalúrgico. En particular el costo total aproximado en que se incurre por pasar desde el concentrado de molibdenita hasta el trióxido de molibdeno grado técnico asciende a 1,1 [usd/lb], costo que no ha variado en gran medida con los años y que permite que el costo del concentrado de molibdenita se relacione directamente con el precio del trióxido de molibdeno. Este último corresponde al precio internacional más utilizado para valorizar los productos en base a molibdeno.

#### **4.2.3. Productos del molibdeno**

Los principales productos comercializables que se producen a partir del mineral de molibdeno corresponden a aquellos que provienen de la vía pirometalúrgica de la tostación. Aquí se destacan el trióxido de molibdeno (óxido de molibdeno grado técnico) y el disulfuro de molibdeno.

En primer lugar, el trióxido de molibdeno corresponde el producto comercial primario que permite la obtención de la mayor parte de otros productos de aplicación industrial de base en molibdeno (como el ferromolibdeno). El óxido de molibdeno se obtiene a partir de la tostación de concentrados de molibdenita, a partir de la siguiente reacción:



El disulfuro de molibdeno se caracteriza por su semejanza en apariencia y textura al grafito, por lo cual es utilizado mayoritariamente como lubricante sólido. Para lograr el compuesto necesario para la industria petroquímica, es necesario que el concentrado de molibdenita pase por etapas de limpieza que asegure la pureza necesaria.

#### **4.2.4. Producción de molibdeno por países**

En la oferta de molibdeno logran destacar un número acotado de países, lo que da cuenta de lo importante que se vuelve cada uno de los agentes que se desenvuelven en este mercado. En la producción de molibdeno es posible destacar tres agentes principales, correspondientes a China en primer lugar (35%), Estados Unidos (E.E.U.U.) en segundo (26%) y Chile en tercero (17%). Estas tres naciones logran concentrar un 78% de la producción mundial (año 2011) y relegan en prioridad a otros países como Perú (8%), México (4%) y Canadá (3%). El Figura siguiente muestra la evolución que ha tenido la producción mundial de molibdeno, destacando la presencia de los tres principales países productores desde 1984. Se muestra el punto de entrada de China en la producción de molibdeno en la década de los 90 y el constante crecimiento que ha tenido, llegando a desplazar a E.E.U.U. como primer productor y romper con la homogeneidad del mismo. El Figura también destaca la presencia de Chile en el mercado mundial, país que a mediados del siglo XXI logró alcanzar una participación extremadamente significativa de casi el 30%, no obstante, esta situación se vio

opacada por la notable irrupción China y la escasez relativa del metal que llevo a alcanzar los peaks de precios del año 2005.

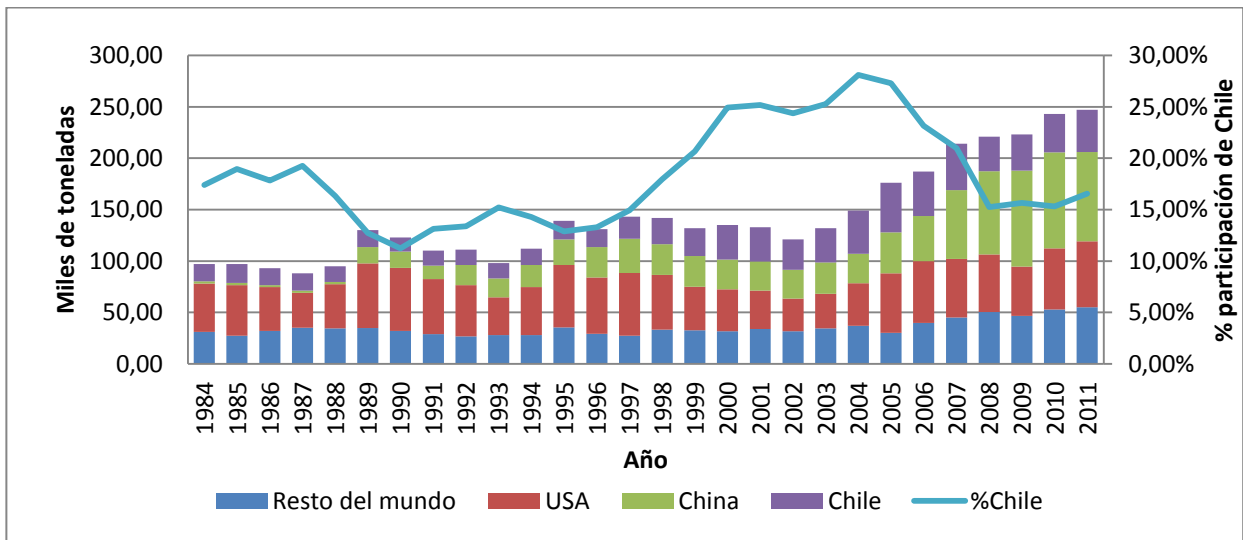
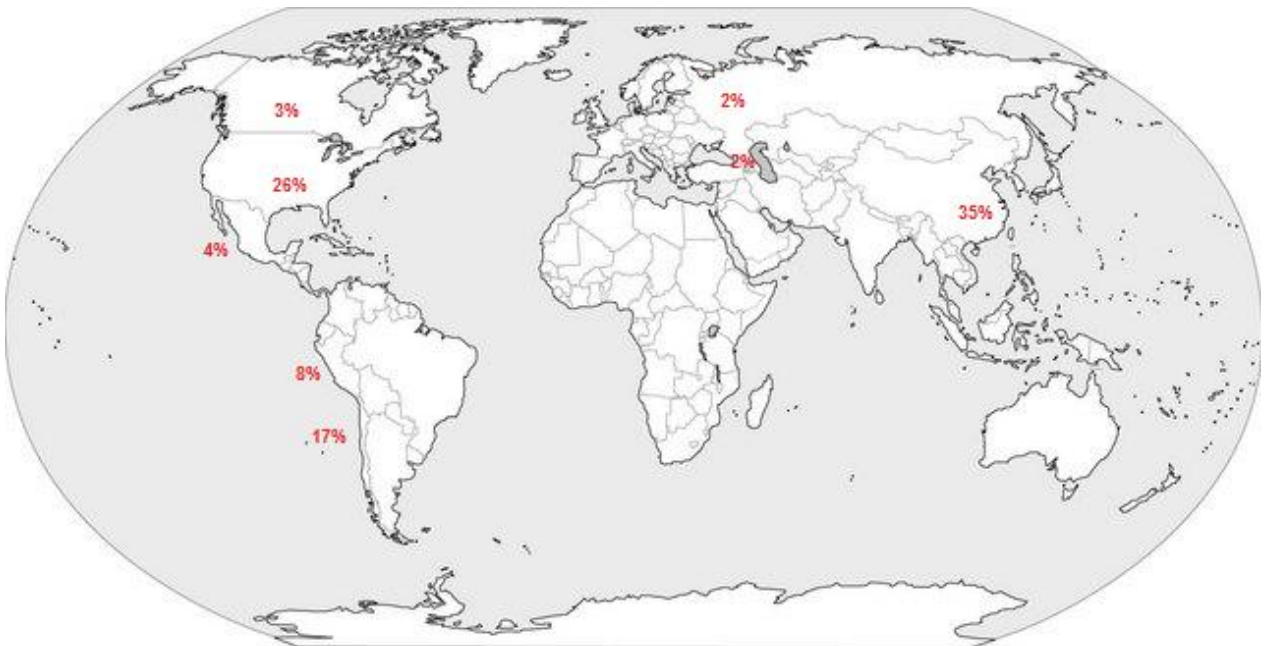


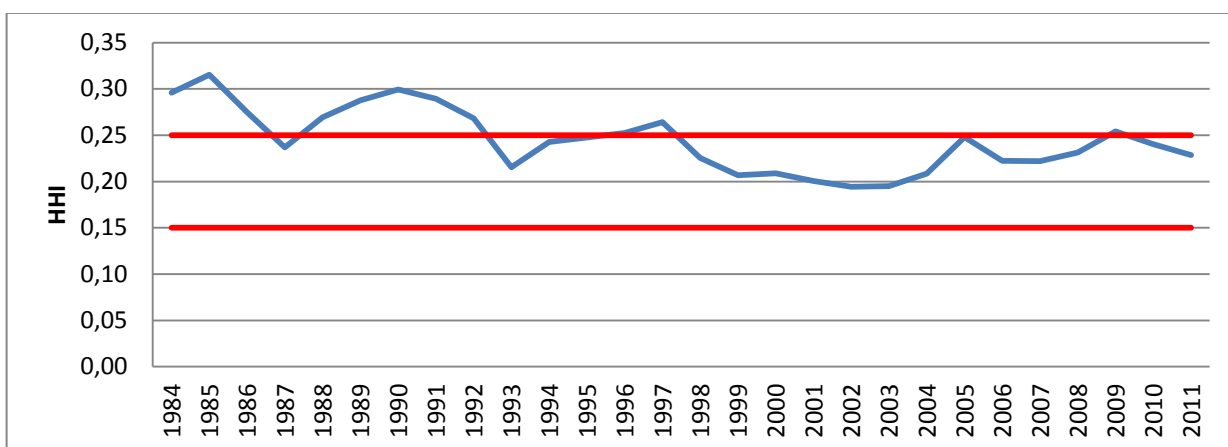
Figura 29 Producción mundial de molibdeno. Elaboración propia en base a información de Raw Materials Database (2012).

Actualmente, Chile se ha estabilizado en una participación cercana a 17% en los últimos años. La siguiente figura da cuenta de la mayor concentración geográfica que existe en la producción de molibdeno, manteniendo una marcada polarización en cuanto a la producción americana y china:



**Figura 30 Distribución geográfica de extracción de molibdeno para el año 2011. Elaboración propia en base a información de Raw Materials Database (2012).**

La concentración de la oferta por países se manifiesta a través del indicador Herfindahl–Hirschman, tal como se muestra en la siguiente tabla a lo largo de los años para la producción de molibdeno de mina:



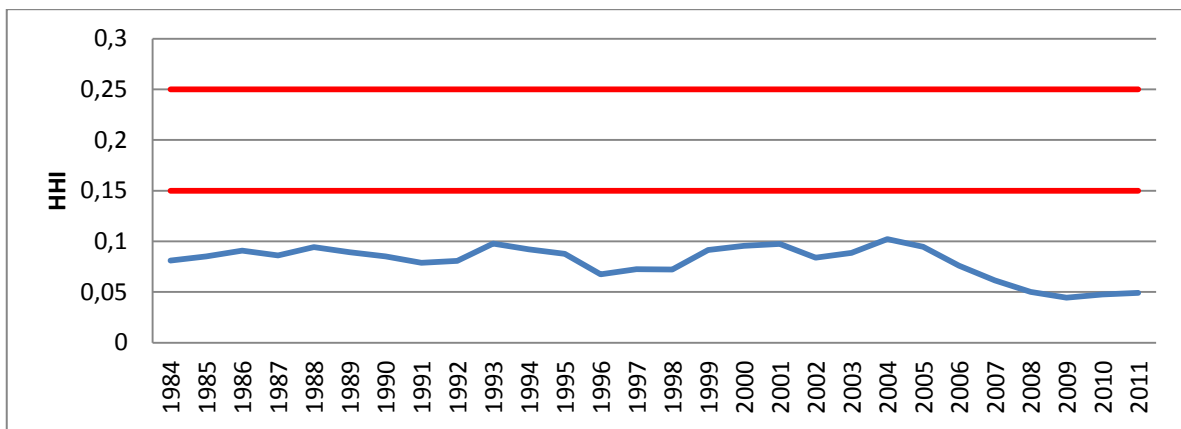
**Figura 31 Evolución de la concentración de la industria por países. Elaboración propia en base a información de Raw Materials Database (2012).**

En rojo se muestran los valores de 0,15 y 0,25, límites que marcan la denominación de un mercado moderadamente concentrado y uno altamente concentrado, respectivamente<sup>7</sup>. Los datos dan cuenta de cómo el mercado del molibdeno ha pasado de la supremacía norteamericana hacia una mayor participación de los yacimientos presentes en otros países.

Si bien los datos anteriores nos permiten generar un marco para comprender los países que conducen los flujos comerciales del molibdeno, no da cuenta de la real manera en que se logra dominar este mercado. Para ello, es necesario estudiar las principales firmas existentes, a modo de conocer la presencia o no de alguna estructura de interés.

Así, el índice de concentración se determina a partir de la participación de las 10 principales compañías, tal como se muestra a continuación:

<sup>7</sup> Según formato utilizado en E.E.U.U. por la *Antitrust Division of the Department of Justice*.



**Figura 32 Evolución de la concentración de la industria por firmas. Elaboración propia en base a información de Raw Materials Database (2012).**

Durante el año 2011, las 10 principales firmas productoras, según los datos del grupo *Commodities Research Unit* (CRU), se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 8 Participación en la producción de molibdeno por firmas (2011)**

<b>Compañía</b>	<b>% participación</b>
Freeport-McMoran	14,06
Corporación Nacional del Cobre	9,32
Shaanxi Non-ferrous Metals	8,1
Grupo México	7,52
China Molybdenum	6,28
Rio Tinto	5,51
Thompson Creek	4,89
Antofagasta	4
Xstrata	2,04
Teck Resources	2,03
<b>Total</b>	<b>63,75</b>

Las compañías anteriores concentran un 63,75% del total de mercado y el cálculo del índice HH alcanza un valor de 0,05.

Una de las principales limitantes para establecer la concentración de las firmas en el mercado del molibdeno se da por la poca transparencia de los datos de las compañías chinas y la manera en que se da a conocer esta información. De acuerdo a lo anterior, el grupo CRU incluye un listado con la participación de mercado de los principales grupos occidentales desde el año 2003. En base a estos datos se calcula el índice de concentración HH:



**Tabla 9 Participación en la producción de molibdeno por firmas**

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
<b>Codelco</b>	17%	21%	20%	15%	13%	9%	8%	9%	9%
<b>Freeport</b>	17%	18%	16%	16%	14%	15%	11%	13%	15%
<b>Kennecott</b>	3%	4%	9%	9%	7%	5%	5%	5%	6%
<b>Grupo México</b>	9%	9%	8%	6%	7%	7%	8%	9%	7%
<b>Thompson Creek</b>	7%	6%	7%	6%	4%	6%	5%	6%	5%
<b>Antofagasta Minerals</b>	6%	5%	5%	5%	5%	3%	3%	4%	4%
<b>Collahuasi</b>	0%	0%	0%	2%	2%	1%	2%	2%	3%
<b>Antamina</b>	0%	2%	4%	4%	3%	2%	1%	1%	2%
<b>Total occidentales</b>	61%	66%	70%	63%	55%	49%	44%	50%	52%
<b>HHI</b>	0,079	0,094	0,091	0,069	0,053	0,043	0,032	0,042	0,046

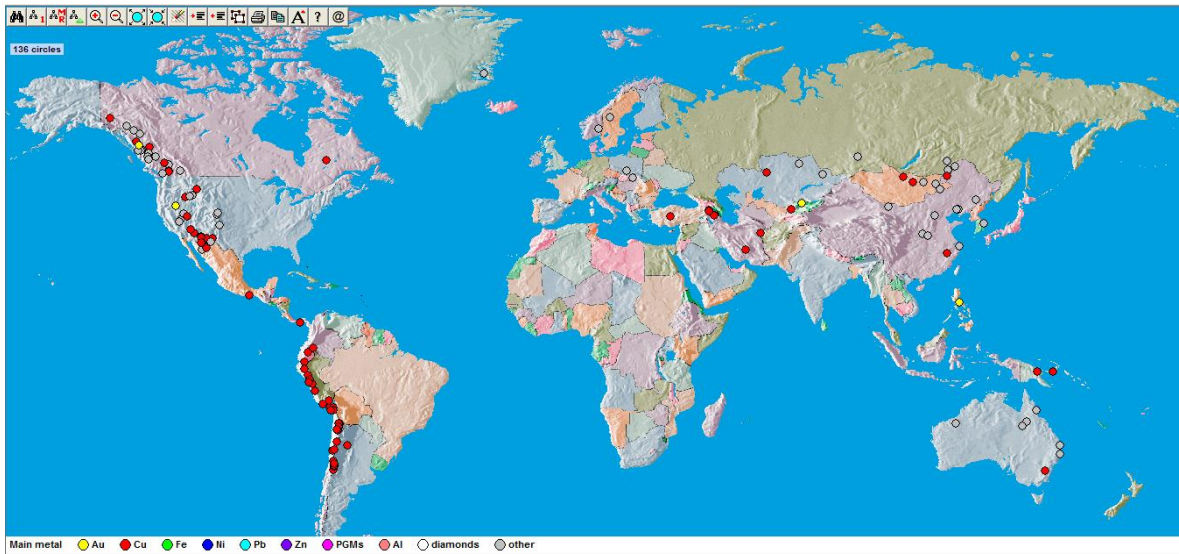
Según los datos, es posible hablar de un mercado no concentrado, por lo menos en lo que respecta a las principales compañías occidentales y su capacidad de generar variaciones en el comercio del molibdeno. Otro factor a considerar corresponde a las firmas que producen molibdeno como subproducto de otro metal (principalmente cobre), lo cual contribuye a que estas compañías no tengan incentivos para incorporarse activamente en las reglas del mercado. Como característica de esta situación se presenta Codelco, que durante todos los años analizados se muestra como un actor pasivo, que entrega gran parte de su extracción de molibdeno a Molymet, quien se encarga de realizar productos de molibdeno a través de la maquila del mineral.

Cada uno de los antecedentes mostrados destaca que la oferta de molibdeno se concentra de manera geográfica en tres países de manera general, pero no se manifiesta una estructura predominante a nivel de compañías.

#### **4.2.5. Proyectos y operaciones de producción de molibdeno**

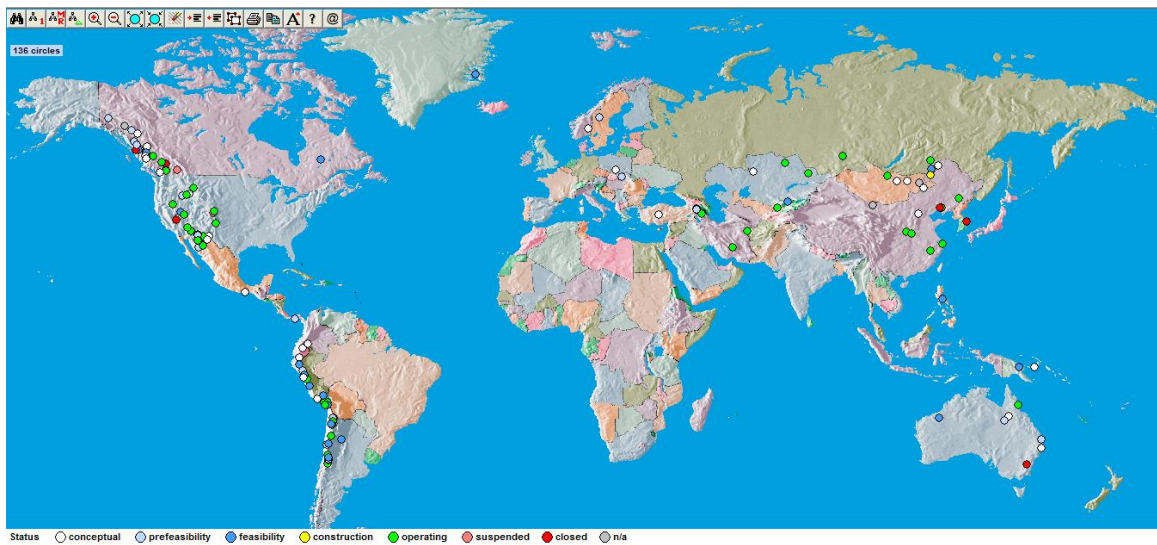
La mayor parte de los proyectos de molibdeno se concentran en la proximidad de la cordillera de los Andes a lo largo del continente americano, destacándose por tratarse de una producción como subproducto del cobre como metal principal. Otros proyectos destacables a nivel mundial se desarrollarán en China, país que cuenta con las mayores reservas de este metal a nivel mundial<sup>8</sup>. El siguiente mapa da cuenta de la situación descrita:

<sup>8</sup> Fuente: Raw Material Database 2012.



**Figura 33 Principales proyectos que contemplan la producción de molibdeno según su metal principal. Fuente: Raw Materials Database (2012).**

A su vez, los proyectos previamente mostrados se diferencian por la fase en que se encuentran, ya sea conceptual, prefactibilidad, factibilidad, construcción, operación, suspendidos o en etapa de cierre:



**Figura 34 Principales proyectos de producción de molibdeno según etapa del proyecto. Fuente: Raw Materials Database (2012).**

La imagen anterior da cuenta de las zonas de donde provendrán las nuevas fuentes de molibdeno a nivel mundial, destacando la gran parte de proyectos que a la fecha se encuentra en etapa de factibilidad en Sudamérica.

En términos de producción de molibdeno, la siguiente imagen destaca el tamaño relativo de cada proyecto en función de su producción esperada:

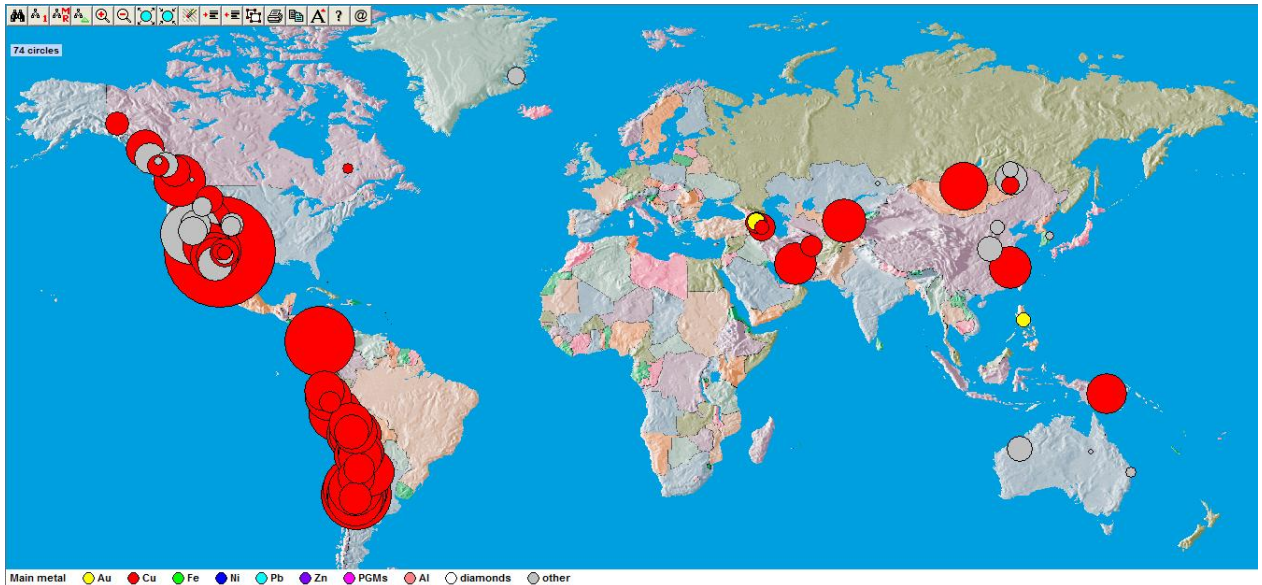


Figura 35 Proyectos de molibdeno según producto principal y producción relativa. Fuente: Raw Materials Database (2012).

#### 4.2.6. Producción y extracción de minerales de molibdeno en Chile

El estudio sobre la oferta de molibdeno destaca la posición chilena en un tercer lugar, tras China y E.E.U.U. El país posee otra característica adicional, pues la totalidad de su producción se realiza como un subproducto del cobre. Esta situación permite posicionar a Chile de manera relevante a la hora de lograr una diferenciación en términos de costos asociados en la producción de este metal, ubicándolo entre los productores de más bajo costo.

Los yacimientos que entregan esta valiosa característica al país son controlados en mayor parte por Codelco, seguido por Antofagasta Minerals (Los Pelambres), AngloAmerican (Los Bronces) y Collahuasi. A su vez, existe una producción minoritaria por parte del proyecto Colihues como tratamiento de relaves de cobre.

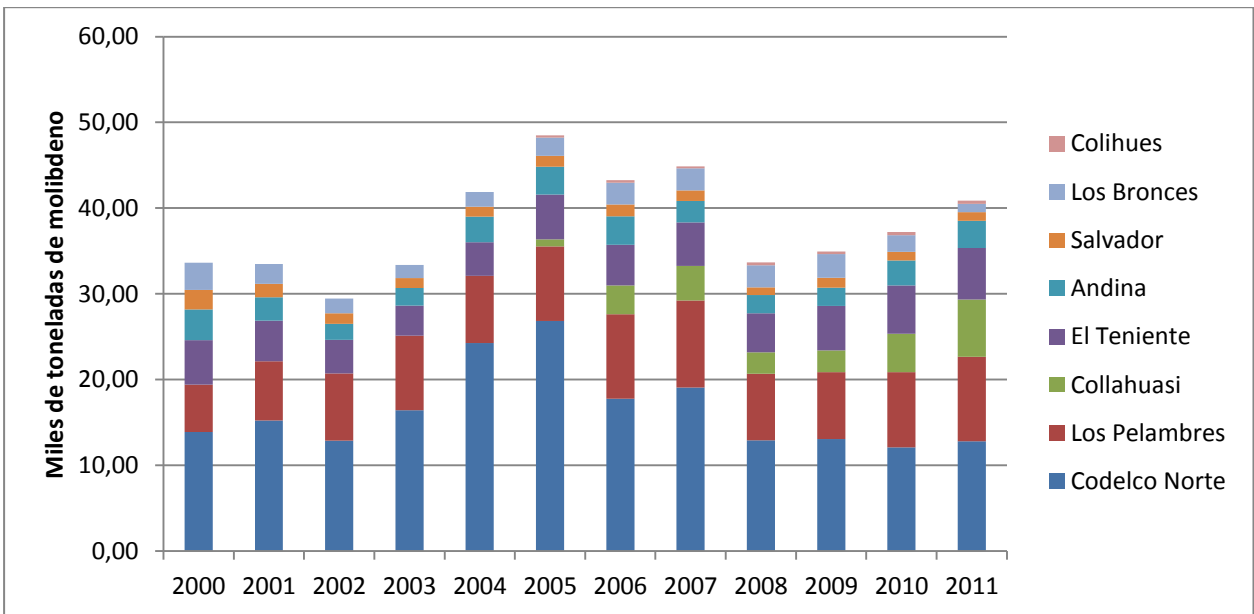


Figura 36 Productores de molibdeno en Chile por mina. Elaboración propia en base a información de Raw Materials Database (2012).

De esta manera, es posible conocer las cantidades extraídas por cada compañía<sup>9</sup>, para realzar los mayores actores en el contexto nacional.

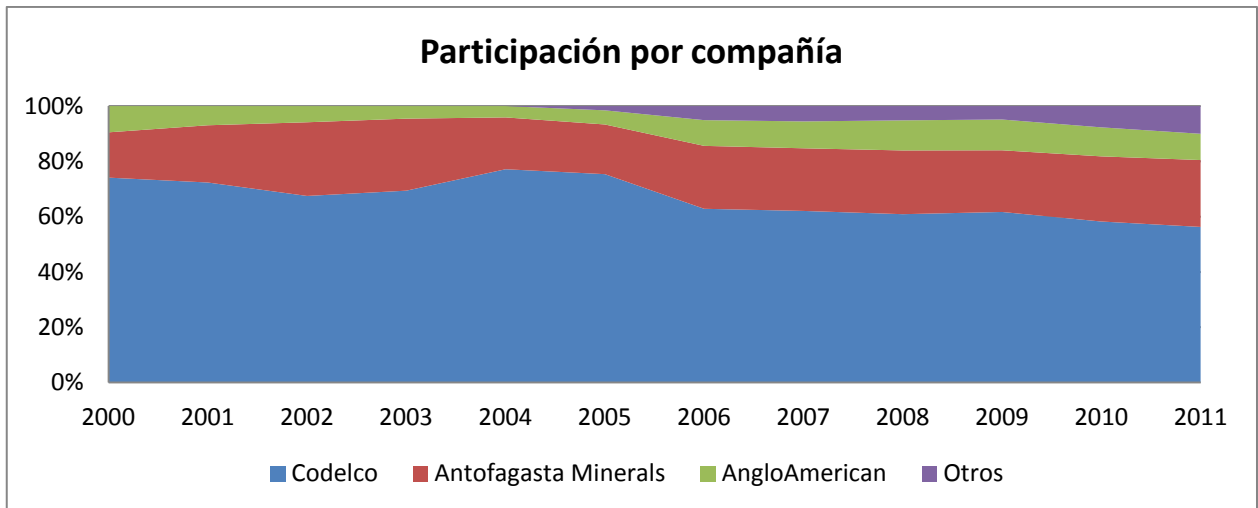
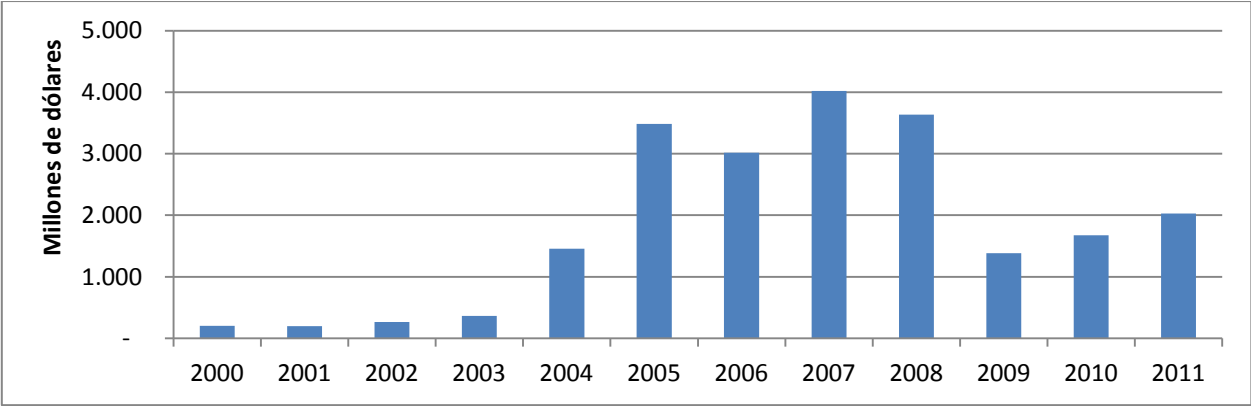


Figura 37 Participación de principales compañías productoras en Chile. Elaboración propia en base a información de Raw Materials Database (2012).

<sup>9</sup> Considerando la propiedad de Collahuasi en un 44% por AngloAmerican y 44% de Xstrata. Los Bronces fue considerado como un 100% propiedad de AngloAmerican.

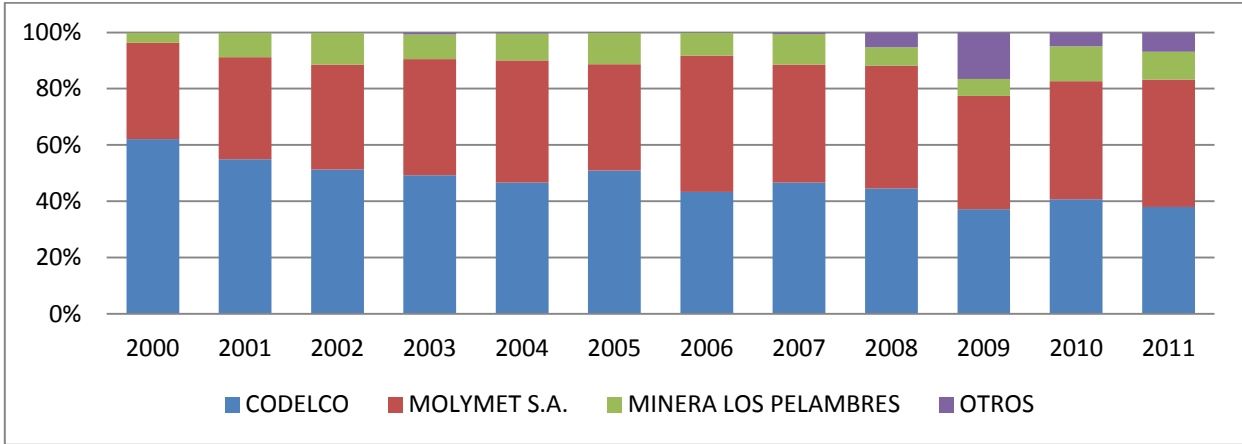
La información anterior destaca la significancia de Codelco en la capacidad de extracción de molibdeno, relegando ampliamente a sus competidores en este mercado. Esta situación se vuelve considerable a la hora de impulsar medidas de políticas públicas, al ser una empresa estatal el agente dominante en la producción.

Complementariamente a lo que indica la extracción, durante la última década las exportaciones chilenas de molibdeno han crecido desde los 200 millones de US\$ en el año 2010 hasta los 2.000 millones de US\$ el año 2011, pasando por un peak de 4.000 millones de US\$ el año 2007<sup>10</sup>.



**Figura 38 Exportaciones de chilenas de productos de molibdeno. Fuente: Servicio Nacional de Aduanas (2012).**

Junto al notable crecimiento en que se ha visto la producción nacional de molibdeno, se deben notar las principales compañías que controlan las exportaciones:



**Figura 39 Exportaciones chilenas de productos de molibdeno por productor. Fuente: Servicio Nacional de Aduanas (2012).**

<sup>10</sup> Datos del servicio nacional de aduanas de Chile (SNA).

El Figura anterior muestra como Codelco, a pesar del lugar que posee como mayor productor de molibdeno de mina, ha ido perdiendo constantemente su posición ante la empresa Molibdeno y metales S.A. quienes se encargan de la transformación y venta del concentrado de molibdenita a través de un proceso de maquila. Del mismo modo, los demás productores mineros carecen de importancia al analizar las exportaciones, apartando de su núcleo de negocio al molibdeno.

En cuanto al destino de las exportaciones, estas se encuentran ampliamente diversificadas, destacando a E.E.U.U., Holanda, Japón, China y Brasil. Para el año 2011, la configuración correspondió a la siguiente:

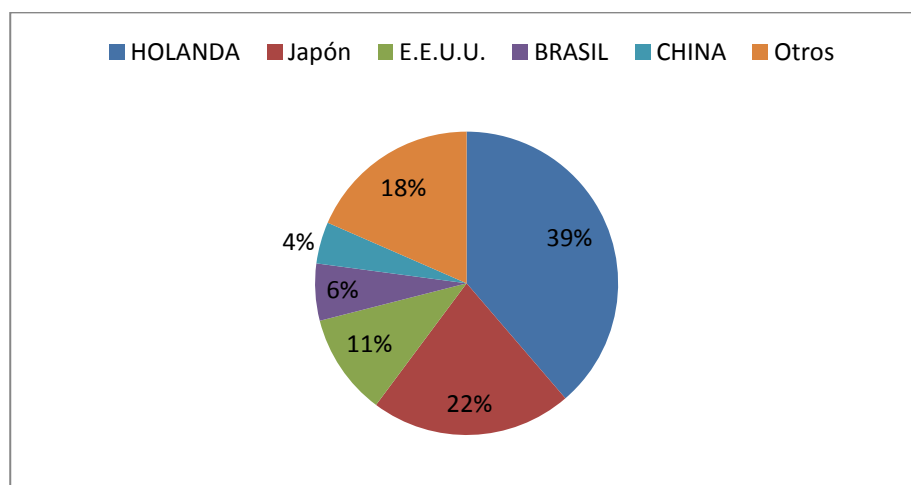


Figura 40 Destino de exportaciones chilenas de molibdeno. Fuente: Servicio Nacional de Aduanas (2012).

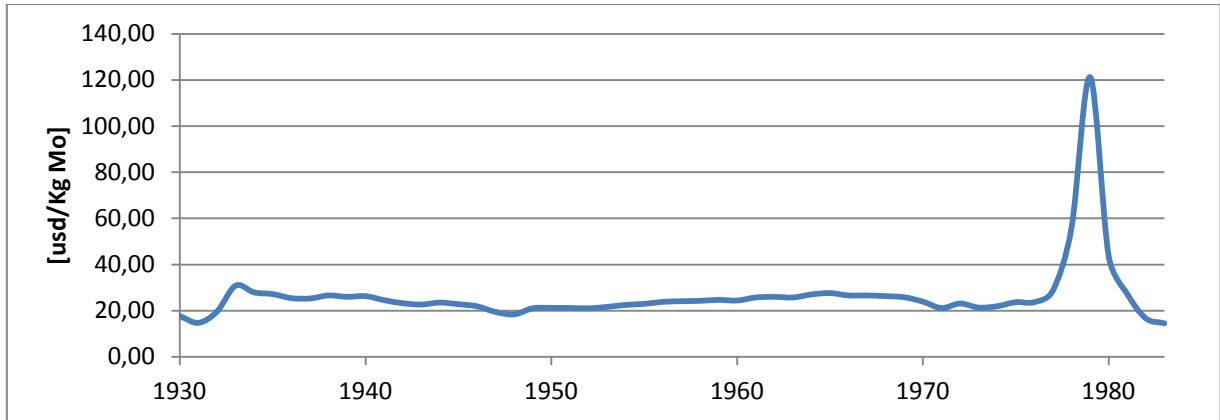
Un aspecto importante del proceso minero relacionado al molibdeno corresponde a la presencia de renio como subproducto. Si bien la contextualización y valorización del renio existente en el molibdeno se aleja de los alcances del trabajo, el conocimiento del mismo y su importancia estratégica debe incorporarse en un trabajo futuro, por lo cual se mantiene como propuesto y se incluye en los anexos una breve caracterización de la industria y del mercado en que se desenvuelve (anexo C).

### 4.3. Precios históricos

La historia del precio del molibdeno se caracteriza por no basarse en un mercado organizado, es decir, que hasta el año 2010 el molibdeno no se transaba en ninguna bolsa de metales. Así, el precio relevante para la comercialización internacional venía dado por el precio del óxido de molibdeno que era fijado como un precio productor.

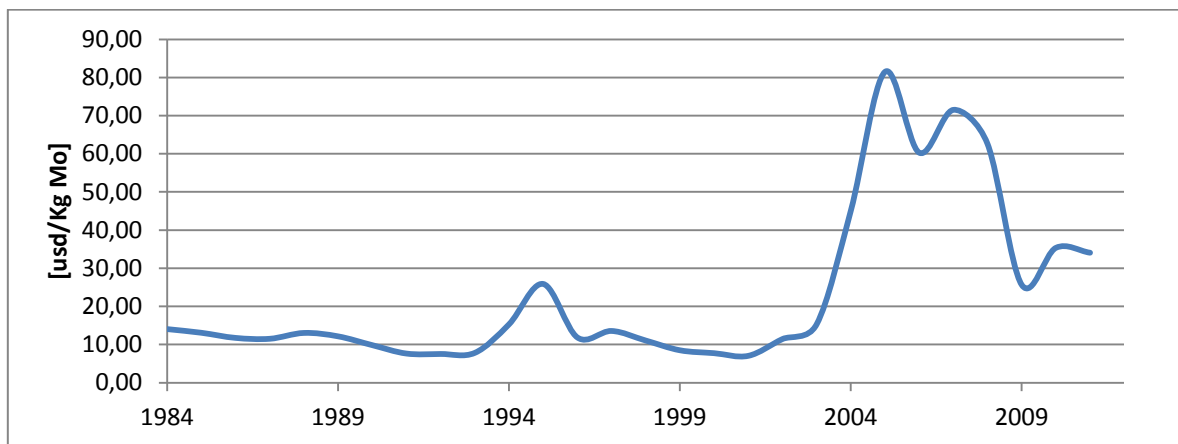
Desde los principios del siglo XX, el precio del molibdeno se mantenía estable, ligado al hecho de que no se había comenzado a utilizar en la industria siderúrgica. De este modo, el molibdeno comienza a tomar relevancia como sustituto del tungsteno en la

aplicación del acero posterior a la segunda guerra mundial. En la década de los 70 el mercado se veía dominado por la firma Climax en E.E.U.U., la cual logró alcanzar un significativo poder mercado que le permitió controlar el precio, lo cual explica las importantes alzas de este período.



**Figura 41 Historia de precios reales (2011) de concentrado de molibdeno (1930 - 1983). Fuente: Vicepresidencia comercialización Codelco (2012)**

El siguiente período se caracteriza por la entrada de nuevas firmas al mercado y el consiguiente aumento de producción, provocado por los aumentos de precio. De aquí en adelante el mercado vuelve a su relativa estabilidad en cuanto al precio, hasta los inicios del siglo XXI, cuando irrumpe en el escenario económico China, lo cual se vuelve un impulso hacia todos los metales en general, debido a su necesidad de crecimiento y desarrollo social. Esta creciente demanda significó una menor disponibilidad de molibdeno para el resto del mundo, lo que causó una escasez relativa y los aumentos de precio respectivos.



**Figura 42 Precios reales (2011) de concentrado de molibdeno (1984 - 2011). Fuente: Vicepresidencia comercialización Codelco (2012)**



La escalada de precios mostrada en el Figura anterior se ve abruptamente cortada por la crisis económico mundial durante el 2008 – 2009, período tras el cual se ha iniciado una pausada recuperación del precio.

Otro factor relevante para comprender los movimientos del precio es la política China sobre barreras a las exportaciones, lo cual siendo China el mayor productor de molibdeno a nivel mundial, limita las existencias de molibdeno para comercializar. En particular, China presenta un impuesto a las exportaciones de molibdeno (óxidos, concentrados y ferro molibdeno) que asciende a un 10% y que llegó hasta 20% durante los años 2007 - 2008(Korinek y Kim 2010).

#### **4.4. Comentarios del capítulo**

La información descrita en el capítulo da cuenta de la relevancia que tiene Chile dentro del mercado del molibdeno (siendo éste un mercado concentrado geográficamente) y de la mejor competitividad que tiene el país al contar con la totalidad de la producción de este mineral como subproducto del cobre, con los beneficios en costos correspondientes. A su vez, da cuenta de la capacidad instalada en el país para el tratamiento de molibdenita, realizando importantes importaciones a través de una única empresa. Las consideraciones anteriores permiten proponer a Chile como un agente de gran impacto en el mercado, que puede aprovechar la posición de la cual dispone. Sumado a lo anterior, se da el caso que el mayor productor nacional es Codelco, empresa privada que mejora la posición del estado en este metal.

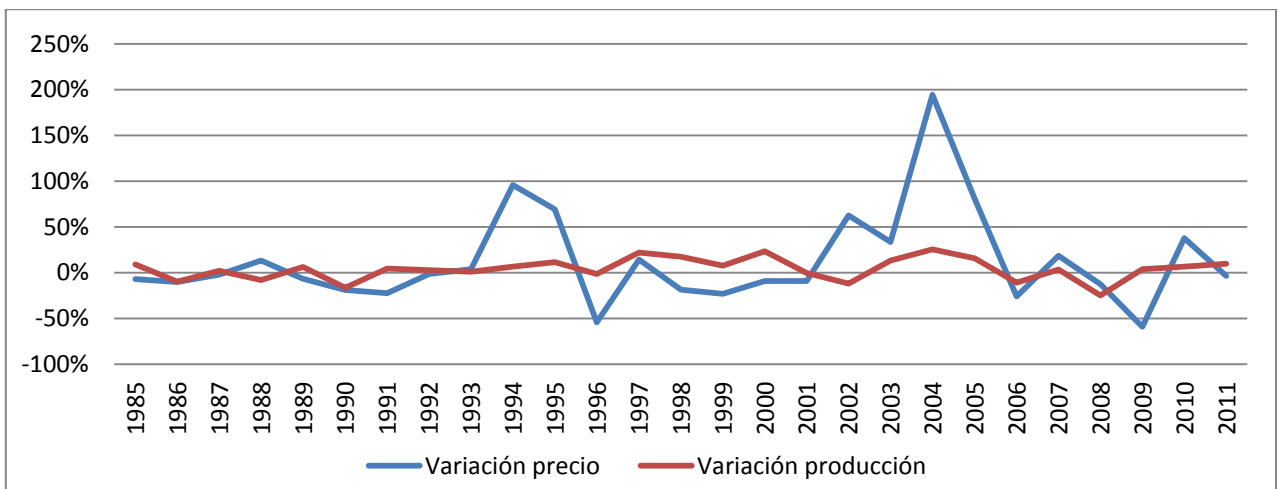
El estudio del mercado del molibdeno, además permite apreciar lo altamente especializado que se encuentra este metal en cuanto a sus principales usos y propiedades, concentrándose su demanda en las aleaciones de acero. Esta situación resulta relevante al vislumbrar un potencial desarrollo de mercado como parte de la influencia del país en el mercado de molibdeno.

### **5. Modelo de agotamiento del molibdeno en Chile**

#### **5.1. Planteamiento del problema**

La extracción de molibdeno en Chile corresponde en su totalidad a un subproducto de la extracción del cobre. Esta situación indica que el molibdeno estará disponible a menores costos, pues el producto principal paga los costos en que se incurren conjuntamente, en particular, a la extracción y gran parte del procesamiento. Del mismo modo, la extracción del mineral de molibdeno se encuentra restringida por la cantidad a extraer de los minerales de cobre relevantes para la firma. De acuerdo a lo anterior, se da que la mayor parte de las ventas de molibdeno no sean planificadas en función de su propio precio, lo que provoca que la extracción no genere cambios comparables a las variaciones del precio:





**Figura 43 Variación anual de producción de molibdeno chilena y variación anual del precio. Elaboración propia.**

Si bien el Figura anterior muestra un aumento de la producción durante los años 2003 – 2006, este no responde a la magnitud del cambio del precio ocurrido. Esto se debe a que los operadores pueden aumentar en el corto plazo la producción de un subproducto, pero con un aumento cercano al 15%<sup>11</sup>.

Considerando como base los modelos planteados en el capítulo II, se ha planteado un modelo de optimización dinámica que busque una utilización eficiente de los recursos de molibdeno del país a lo largo de un determinado horizonte de evaluación.

Así, la función que se busca maximizar corresponde a la siguiente:

$$\text{máx} \int_0^{\infty} e^{-\rho \cdot t} \cdot \{(p \cdot q_v) - C(q_{e,v}, q_{i,v}) - C_o(Q_i, \rho, p)\} \cdot dq \quad (18)$$

La ecuación representa los ingresos provenientes de las cantidades vendidas de molibdeno ( $q_v$ ) en cada período y los costos totales asociados a la extracción ( $q_{e,v}$ ) y manejo de los mismos ( $q_{i,v}$ ). Por último, el tercer término refleja el costo de oportunidad de no vender la cantidad de molibdeno acumulada ( $Q_i$ ), este costo depende a su vez de la tasa de interés utilizada en la evaluación ( $\rho$ ) del año considerado y del precio que tiene el producto en ese momento.

La función de costo de oportunidad planteada debe ser considerada a partir de dos componentes esenciales. En primer lugar se identifica el costo asociado a guardar el

<sup>11</sup> Entrevista Vicepresidencia de comercialización de Codelco (Mayo 2012).

inventario del producto, que en este caso se modela a través de un costo medio constante por período ( $C_m$ ):

$$C_{inventario}(Q_i) = C_m \cdot Q_i \quad (19)$$

La otra componente del costo viene dada por el costo de oportunidad de no vender las cantidades almacenadas del metal. Este costo corresponde al valor de la cantidad acumulada, determinado por la tasa de descuento relevante del año en cuestión (o tasa de interés) y el precio al cual se transa el bien en ese año:

$$C_{oportunidad}(Q_i, \rho, p) = \rho \cdot Q_i \cdot p \quad (20)$$

En estricto rigor, en lugar del precio debe utilizarse el margen correspondiente entre el precio y los costos asociados al manejo y venta.

Junto a la función a maximizar presentada se adjuntan una serie de restricciones, las cuales permiten encontrar la solución del problema de optimización lineal:

$$q_{e,v} + q_{e,i} \leq Q_e \quad (21)$$

La relación anterior podría interpretarse como la restricción por subproducto, debido a que la máxima cantidad a extraer de molibdeno, tanto dirigido a venta ( $q_{e,v}$ ) o a stock ( $q_{e,i}$ ), no puede sobrepasar a la cantidad contenida de molibdeno en el mineral de cobre planificado previamente ( $Q_e$ ). La desigualdad anterior se vuelve claramente en igualdad a la hora de buscar un máximo, para aumentar los beneficios totales de la extracción.

La siguiente restricción corresponde a la variación de la cantidad acumulada de molibdeno en cada período:

$$\dot{Q}_i = q_{e,i} - q_{i,v} \quad (22)$$

Del mismo modo, se expresa la variación de las reservas del metal, la cual depende del destino al cual se someta el mineral extraído:

$$\dot{R} = -q_{e,i} - q_{e,v} \quad (23)$$

Finalmente, el problema debe incluir las restricciones sobre la identidad de las variables de decisión:

$$\begin{aligned}
 q_{e,i} &\geq 0 \\
 q_{i,v} &\geq 0 \\
 q_{i,v} &\leq Q_i
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

El problema planteado anteriormente se resuelve considerando una tasa de descuento constante en el período de evaluación y utilizando las herramientas matemáticas del control óptimo, por lo cual el Hamiltoniano queda caracterizado por:

$$H = e^{-\rho t} \cdot \{ (p \cdot q_v) - C(q_{e,v}, q_{i,v}) - C_O(Q_i, \rho) \} - \lambda_1 \cdot (q_{e,i} + q_{e,v}) + \lambda_2 \cdot (q_{e,i} - q_{i,v})
 \tag{25}$$

De este modo, las ecuaciones de optimalidad del problema a resolver corresponden a:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial H}{\partial q_{e,i}} = 0 &= e^{-\rho t} \cdot \left\{ -p + \frac{\partial C(Qe - q_{e,i}, q_{i,v})}{\partial q_{e,i}} \right\} + \lambda_2 \\
 \frac{\partial H}{\partial q_{i,v}} = 0 &= e^{-\rho t} \cdot \left\{ p - \frac{\partial C(Qe - q_{e,i}, q_{i,v})}{\partial q_{i,v}} \right\} - \lambda_2
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

Por otro lado, las variables de estado verifican las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial H}{\partial R} = -\dot{\lambda}_1 &= 0 \\
 \frac{\partial H}{\partial Q_i} = -\dot{\lambda}_2 &= e^{-\rho t} \cdot \frac{\partial C_O(Q_i, \rho)}{\partial Q_i}
 \end{aligned}
 \tag{27}$$

Finalmente, las restricciones de transversalidad deben cumplir con:

$$\begin{aligned}
 \lim_{t \rightarrow T} \lambda_1 \cdot R &= 0 \\
 \lim_{t \rightarrow T} \lambda_2 \cdot Q_i &= 0
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

Las relaciones anteriores permiten descubrir el camino óptimo que se debe cumplir para la extracción.

## **5.2. Calibración del modelo**

Del planteamiento mostrado en el punto anterior se desprende la necesidad de contar con valores o parámetros de entrada que permitan llegar a resultados consistentes, que den cuenta de un modelo robusto y la posibilidad de realizar un case base de análisis.

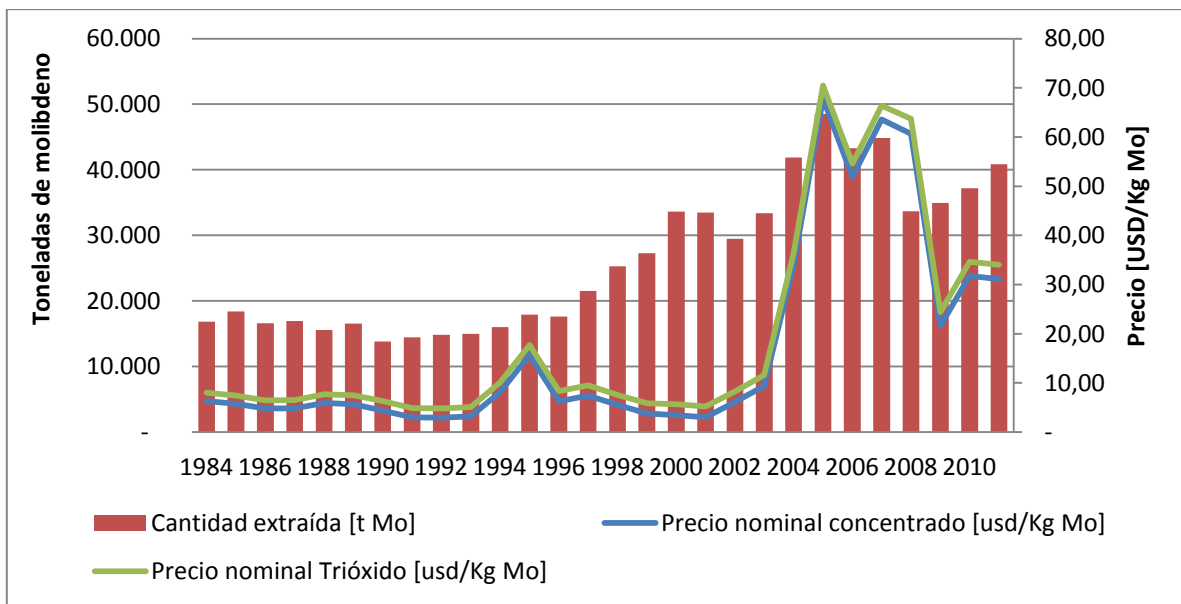
La sección consistirá en dar cuenta de los parámetros utilizados por el modelo y del análisis de un caso base de comparación para el modelo propuesto.

### **5.2.1. Parámetros de entrada**

En primer lugar, se destacan los precios históricos del molibdeno desde el año 1984 a 2011, los cuáles son acompañados por la cantidad de molibdeno de mina extraído en Chile en el mismo período. No obstante, los precios definidos corresponden al precio del trióxido de molibdeno, el cual posee un costo de procesamiento adicional por sobre el concentrado de molibdenita dado el proceso de tostación y limpieza por el cual debe pasar. Así, el primer parámetro que debe considerarse en el modelo corresponde a considerar el menor margen de beneficio sobre el precio, debido al costo de procesamiento y venta de concentrado de molibdenita. Dada la información recopilada y mencionada en el capítulo anterior, este costo alcanzó un valor de 1,35 [usd/lb], desglosado en 1,1 [usd/lb] como costo de procesamiento y 0,25 [usd/lb] como costo de venta del producto. Los valores declarados provienen de las entrevistas y la información de comercialización de la Corporación Nacional del Cobre, por lo cual puede utilizarse como dato adecuado para valorizar el concentrado de molibdenita en Chile.

Otros costos para la obtención del concentrado de molibdenita no son considerados, dado su peso marginal, como por ejemplo el costo que tiene el proceso de flotación selectiva de los minerales de molibdeno sobre los de cobre. Se debe recordar además la condición de sub producto del molibdeno, lo cual hace que no se asocian costos de extracción a este mineral.

De esta manera, la siguiente figura ilustra la variación por efecto de considerar la venta del concentrado de molibdenita (a un menor precio) por sobre la de trióxido de molibdeno:



**Figura 44 Extracción de molibdeno en Chile y precio de concentrado de molibdenita nominal. Elaboración propia en base a información de Raw Materials Database (2012).**

Otro parámetro relevante a utilizar por el modelo corresponde a la tasa de descuento, la cual fue considerada de manera constante en 10% para todo el horizonte de evaluación. La relevancia de este parámetro se manifiesta en el hecho de la valorización en el costo de oportunidad del material no dispuesto en el mercado y en el peso intertemporal relativo que tiene la producción en cada año.

En último lugar, se deben definir los parámetros asociados al costo de inventario para que se trate de valores adecuados y que den cuenta de las posibles restricciones de capacidad que puedan existir. Según los autores (Geman y Smith 2012) los costos de inventario para los metales base varían (a nivel mundial) en el rango de 0,36 a 0,46 [usd/ton-día], valor que puede ser utilizado para cuantificar el valor de almacenamiento de concentrado de molibdeno. Además, la publicación “*Theory of Storage, Inventory and Volatility in the LME Base Metals*” (Geman y Smith 2012) destaca que los valores presentan mínimas variaciones de un año a otro. Así, el valor medio indicado por los autores alcanza el valor de 0,40 [usd/ton-día].

Dada la información anterior, es esperable (en términos teóricos) que la forma de la curva de costos medios de inventario se presente de la siguiente manera:

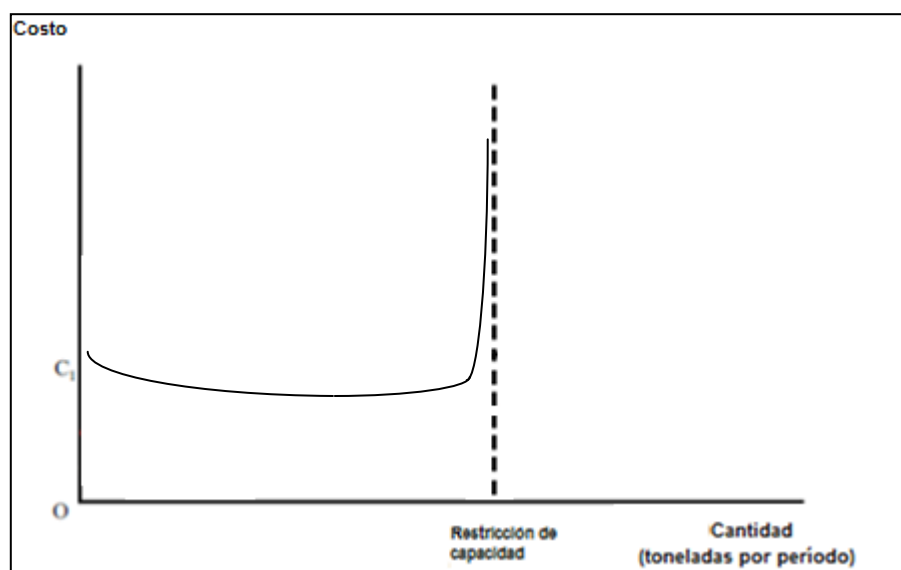


Figura 45 Forma curva de costos medios de inventario teórica para el caso propuesto.

La curva da cuenta de una mínima variación en cuanto a costos medios por almacenamiento del mineral, los cuales se incrementan de manera exponencial al aproximarse a la restricción de capacidad del inventario. Para la evaluación se ha considerado una capacidad de 65.000 [ton] de molibdeno fino contenido, con un respectivo análisis de sensibilidad sobre esta variable. Además, para la evaluación se considerará una ley de molibdeno para el concentrado de molibdenita de 59%.

Cada uno de los parámetros previamente mencionados permiten obtener los resultados propios del caso base de comparación del modelo.

### 5.2.2. Caso base

Según lo explicado en el punto anterior, los parámetros utilizados son los siguientes:

Tabla 10 Parámetros de entrada evaluación caso base

Parámetro	Unidad	Valor
Tasa de descuento	%	10
Costo medio stock	USD/ton	146
Costo procesamiento molibdenita	USD/Kg Mo	2,43
Costo venta concentrado	USD/Kg Mo	0,55
Ley Mo en concentrado	%	59

Para la elaboración del caso base se determinó el valor total (VAN) imponiendo la restricción de capacidad máxima de inventario igual a 0, lo que entrega la línea base de comparación para la evaluación del modelo:

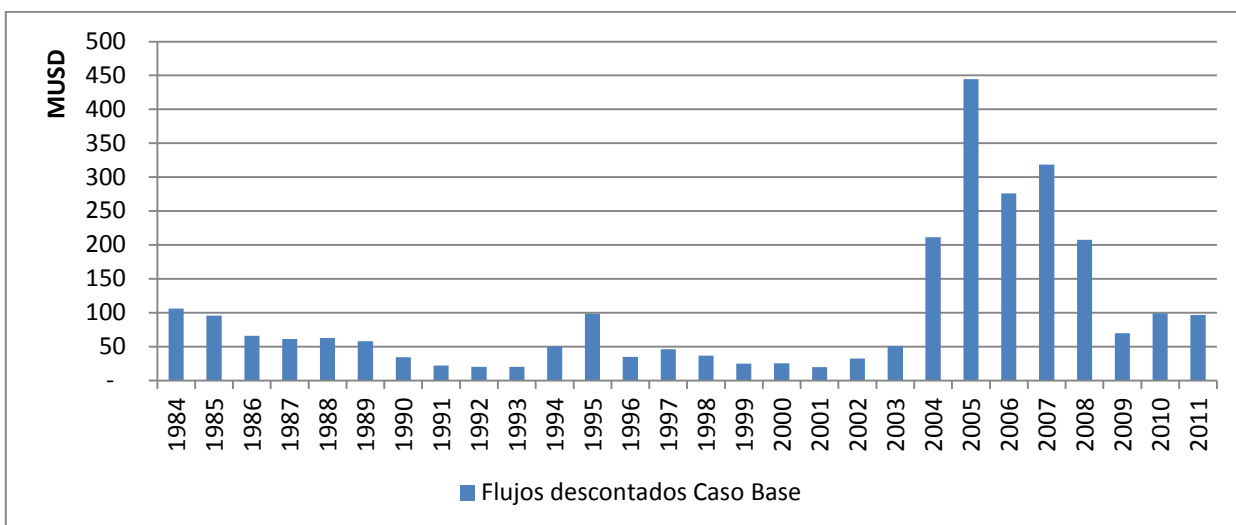


Figura 46 Flujos descontados para caso base modelo.

Así, el VAN del caso base alcanza un valor total de 2.691 [MUDS], el cual corresponde al valor que habrían tenido las ventas de molibdeno en Chile sin considerar ninguna política de inventarios.

### 5.3. Resultados del modelo

El problema planteado anteriormente se resuelve a partir de los datos provenientes de la base de datos Raw Materials sobre extracción de molibdeno en Chile y los precios nominales del concentrado de molibdeno, facilitados por el área de comercialización de Codelco.

Para determinar los resultados, se utilizó una tasa de descuento constante de 10% para todo el horizonte de evaluación. Tal como se hizo en el planteamiento del problema las variables de decisión corresponden a la cantidad que se procura establecer como inventario cada año y la cantidad que se sustrae del mismo. De este modo y gracias a las relaciones ya planteadas, se permite generar un modelo de optimización dinámica.

Tal como se mencionó previamente, se destaca el uso del precio correspondiente al concentrado de molibdenita, donde el costo asociado a su extracción y procesamiento es marginal en comparación al precio. Esta situación se genera por tratarse de un subproducto en el total de yacimientos existentes en Chile, por lo cual su costo de extracción es cargado al metal principal, tal como la mayor parte del proceso de concentración. La única etapa que permite ser cargada al molibdeno es la flotación

selectiva (posterior a la colectiva junto al cobre), la cual posee costos de implementación que no afectan el análisis realizado.

Por otro lado, tal como se mencionó en el capítulo anterior, el proceso de limpieza y tostación para generar los productos de mayor comercialización de molibdeno poseen un costo cercano a 1,1 [usd/lb Mo], lo que puede considerarse cuantitativamente como bajo, pero no despreciable para el análisis, considerando además de que el proceso de obtención de los productos de disulfuro de molibdeno y óxido de molibdeno son generados por agentes económicos distintos y no integrados.

Una última restricción debe ser añadida al modelo, consistente en la capacidad máxima del inventario el cual se pueden stockear los minerales. En particular para el modelo se ha considerado una capacidad máxima de 65.000 [ton Mo].

Así, el modelo encuentra un óptimo por sobre la estrategia de utilización de recursos, mostrando que en base a las consideraciones anteriores, el valor total generado sea mayor, con respecto a los datos históricos (caso base):

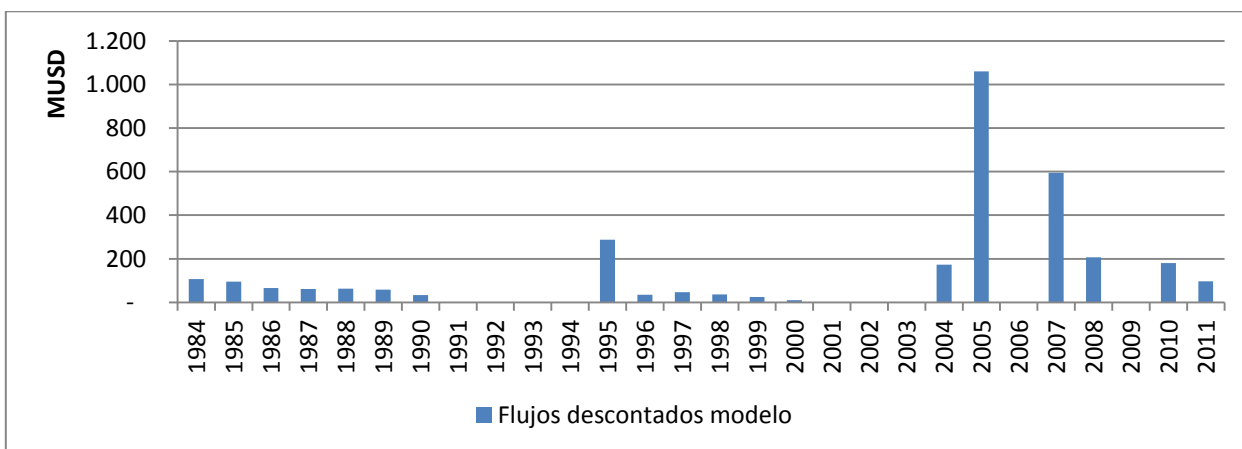


Figura 47 Flujos descontados según resultado de modelo. Elaboración propia en base a resultados de modelo propuesto.

De este modo, la comparación con el caso base es la siguiente:

Tabla 11 Resultados de modelo de propuesto

Caso	Unidad	Beneficio descontado
<b>Resultado modelo</b>	Millones de US\$	3.238,7
<b>Caso base</b>	Millones de US\$	2.691,0
<b>Valor agregado</b>	<b>Millones de US\$</b>	<b>547,7</b>
<b>Valor agregado</b>	<b>%</b>	<b>20,4</b>



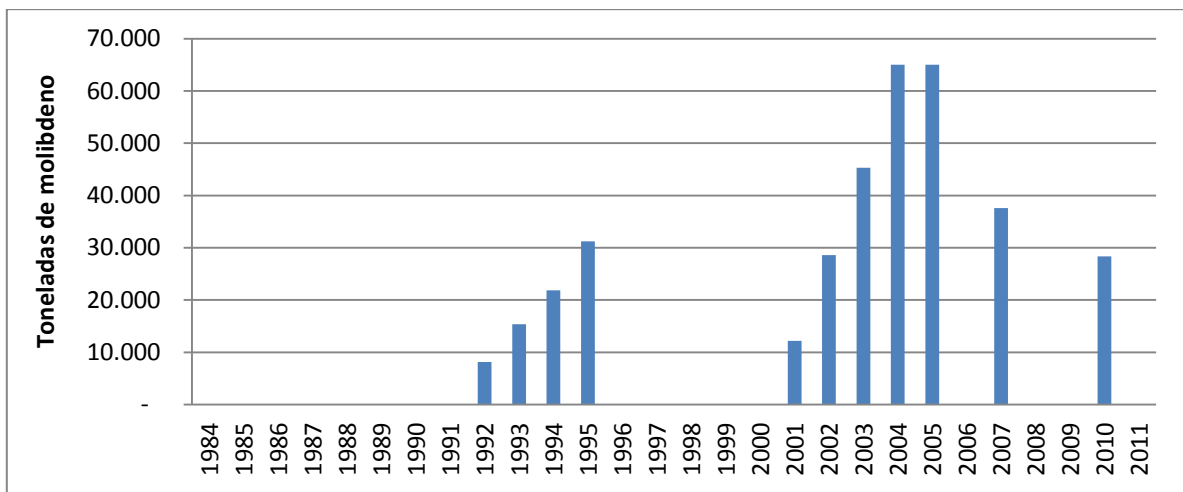


Figura 48 Inventarios nacionales de molibdeno según resultado de modelo. Elaboración propia en base a resultados de modelo propuesto.

La situación se contrapone a la situación inicial en la cual no se permite una estrategia distinta para este subproducto del cobre, por lo cual se exhibe una posibilidad de aumento de eficiencia en cuanto al uso del recurso:

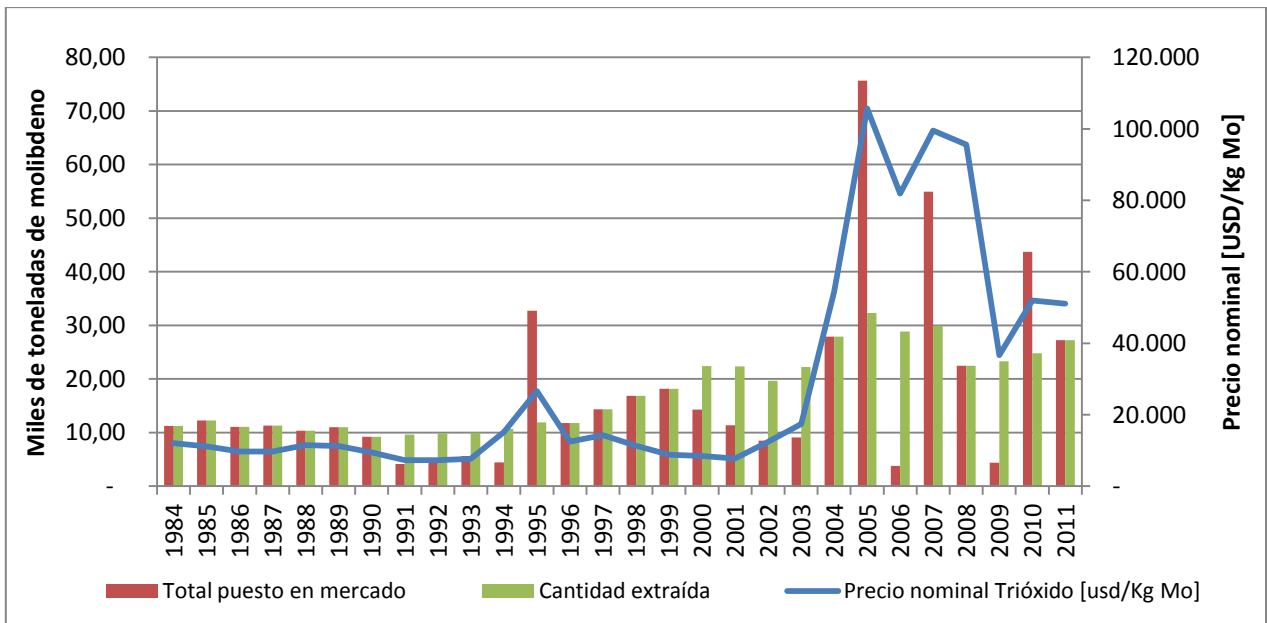


Figura 49 Utilización óptima de y precio de molibdeno. Elaboración propia en base a resultados de modelo propuesto.

Los resultados dan cuenta que a pesar del costo real y de oportunidad que significa el mantener un inventario del recurso, este ha tenido la posibilidad de ser una estrategia beneficiosa (respecto al caso base) en términos de creación de valor. Una consideración clara consiste en que la evaluación se realiza sin fallas de información,

es decir, conociendo los precios en cada período. Esta consideración es relevante y se tratará en los análisis de resultados del modelo, no obstante, se debe recordar que el modelo se realiza en esperanza de una situación ideal y busca mostrar o descartar una estrategia.

El detalle de los datos utilizados y resultados del modelo se entrega en anexo D de este trabajo.

#### 5.4. Análisis de sensibilidad

Según los resultados anteriores, se realizará una sensibilidad con respecto a los siguientes parámetros de entrada:

**Tabla 12 Parámetros de entrada sujetos a sensibilidad**

Parámetro	Unidad	Valor
Tasa de descuento	%	10
Costo medio stock	USD/ton	146
Costo procesamiento molibdenita	USD/Kg Mo	2,43
Costo venta concentrado	USD/Kg Mo	0,55
Capacidad máxima inventario	Ton Mo	65.000

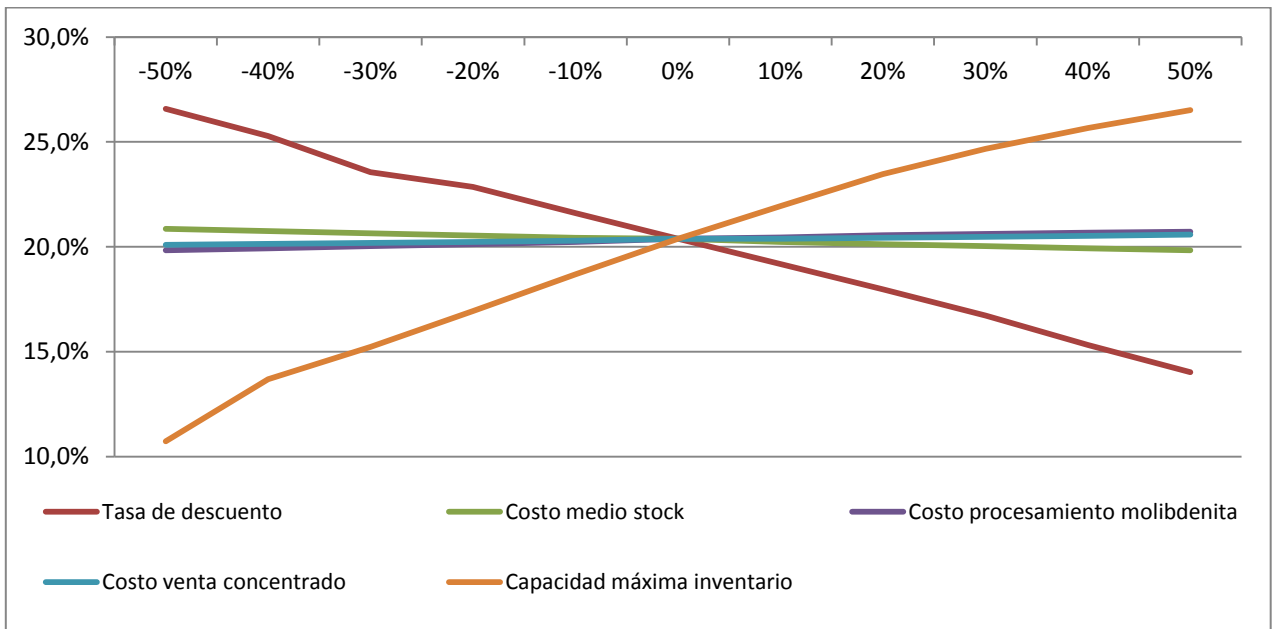
La manera en que se realizará el análisis de sensibilidad será de acuerdo a las variaciones de los parámetros mencionadas en la tabla anterior y su impacto en el valor incremental del modelo sobre el caso base, es decir, la sensibilidad toma en cuenta la variación de valor que entrega la estrategia de inventarios.

Según los parámetros propuestos en la tabla anterior, los resultados del análisis de sensibilidad se presentan a continuación:

**Tabla 13 Resultados análisis de sensibilidad para los distintos parámetros**

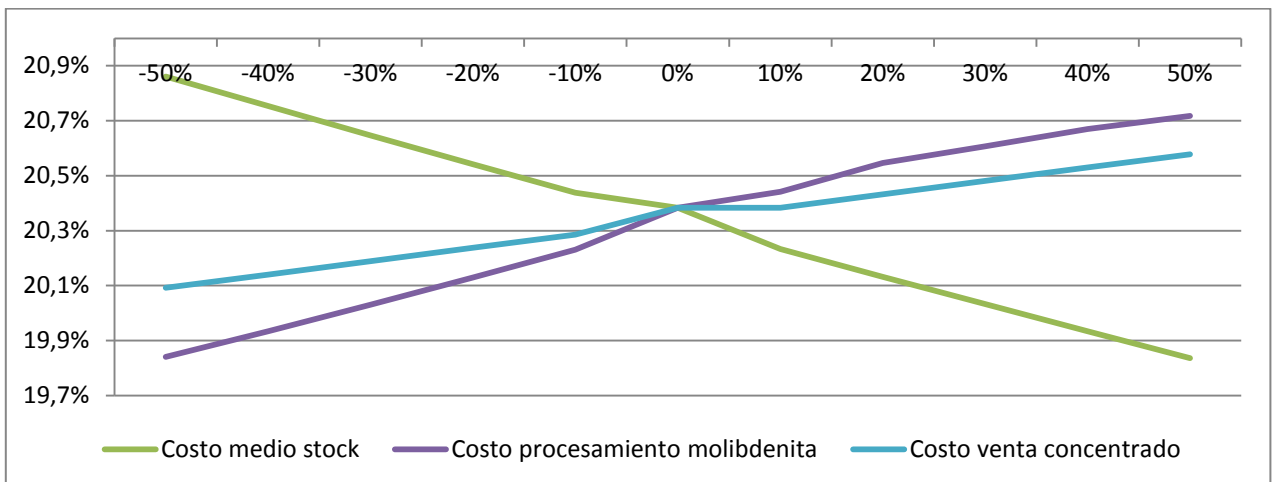
Parámetro	-50%	-40%	-30%	-20%	-10%	0%	10%	20%	30%	40%	50%
Tasa de descuento	26,6%	25,3%	23,6%	22,9%	21,6%	20,4%	19,2%	18,0%	16,7%	15,3%	14,0%
Costo medio stock	20,9%	20,8%	20,6%	20,5%	20,4%	20,4%	20,2%	20,1%	20,0%	19,9%	19,8%
Costo procesamiento molibdenita	19,8%	19,9%	20,0%	20,1%	20,2%	20,4%	20,4%	20,5%	20,6%	20,7%	20,7%
Costo venta concentrado	20,1%	20,1%	20,2%	20,2%	20,3%	20,4%	20,4%	20,4%	20,5%	20,5%	20,6%
Capacidad máxima inventario	10,7%	13,7%	15,2%	16,9%	18,7%	20,4%	21,9%	23,5%	24,7%	25,7%	26,5%

Una manera adecuada de representar los resultados anteriores se manifiesta a través de la siguiente figura:



**Figura 50 Sensibilidad sobre el aporte de valor de la estrategia de inventarios a partir de distintos parámetros. Elaboración propia en base a resultados de modelo propuesto.**

De los resultados anteriores se desprende la mayor sensibilidad de la estrategia según los valores de la tasa de descuento considerada y la capacidad máxima asignada al inventario. Para apreciar los otros tres parámetros se presenta la figura sin las variables más sensibles:



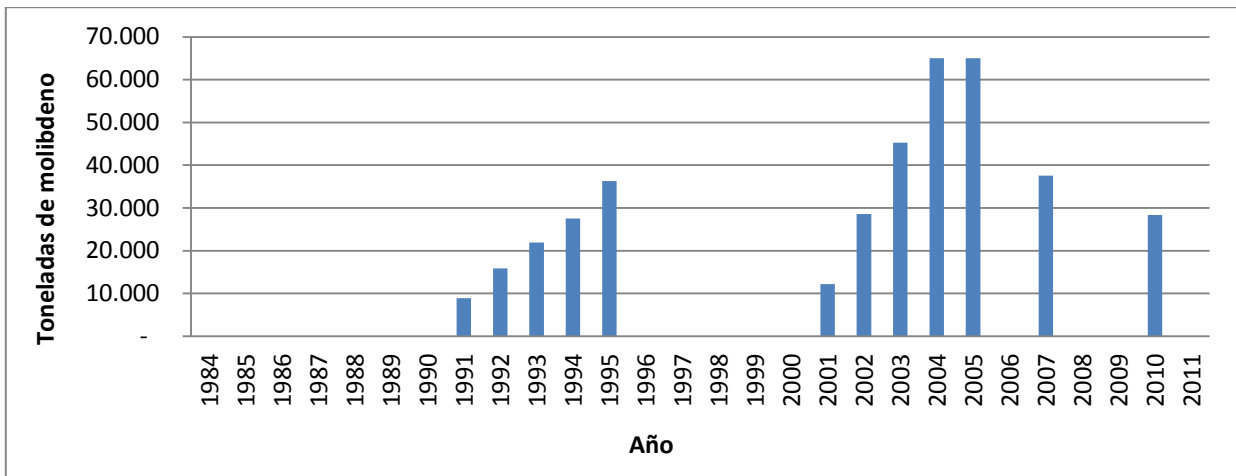
**Figura 51 Sensibilidad sobre el aporte de valor de la estrategia de inventarios para variables menos sensibles. Elaboración propia en base a resultados de modelo propuesto.**

De la figura anterior se da el caso de que la estrategia de inventarios aporta menos valor al disminuir los costos de procesamiento y venta de la molibdenita. La situación se explica por el hecho de que si en el mercado se aprecian menores costos para la venta del mineral, entonces convendrá vender aquel producto y será menos beneficioso realizar un stock.

Del mismo modo y de manera esperable, una disminución del costo medio de inventario impacta positivamente en el valor que puede agregar la opción de un stock de molibdenita. Si bien se da el caso que la sensibilidad de los costos (inventario, venta y procesamiento) responde de manera lógica ante variaciones de estos parámetros, éstos no logran ser de gran impacto en la creación de valor de la alternativa, significando variaciones menores al 1%.

Por otro lado, el análisis en torno a la tasa de descuento utilizada muestra que una menor tasa consideraba permitiría alcanzar un mayor valor a la consideración de inventarios. Este resultado refleja el hecho de que una menor tasa de descuento conlleva un menor costo de oportunidad de los activos (Ecuación 20) y por lo tanto permite generar stock del mineral a un menor costo.

En último lugar se presenta el parámetro que impacta de mayor manera en el análisis, que corresponde a la capacidad máxima del inventario. El hecho de permitir un mayor nivel de inventarios lleva a un mayor aumento de valor de esta política, no obstante, existe un punto de saturación, en el cual esta restricción deja de ser activa:



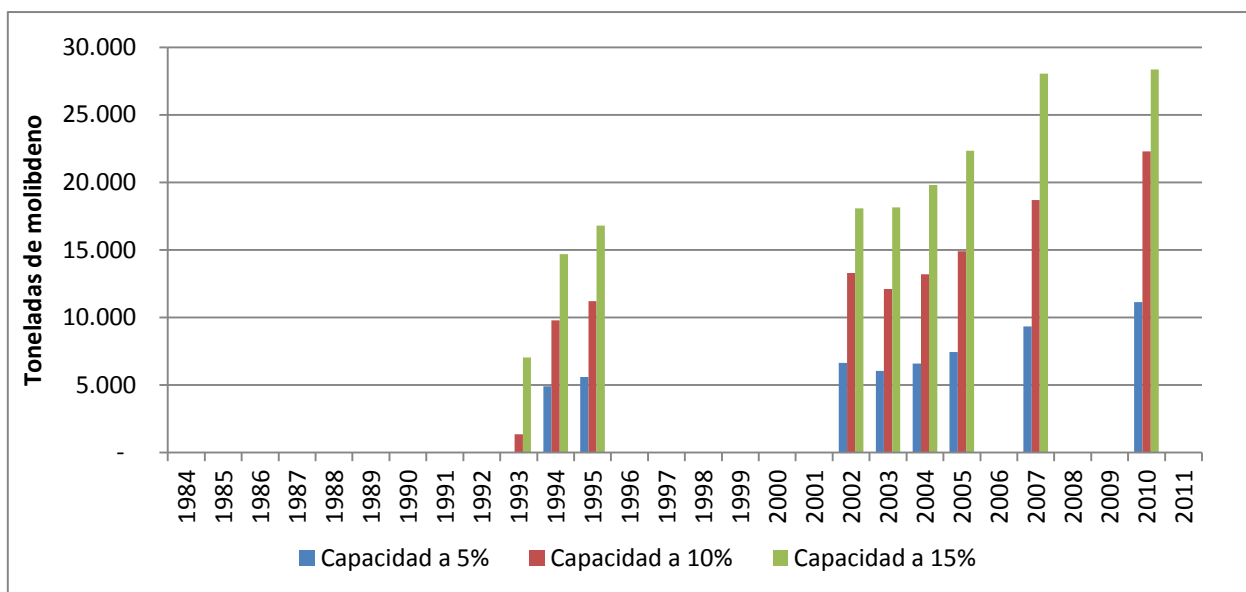
**Figura 52 Inventarios de molibdeno sin restricción de capacidad. Elaboración propia en base a resultados de modelo propuesto.**

Sin esta restricción el stock máximo alcanza un valor de 107,4 [kt Mo], y el incremento de valor llega a 27,5%.

Si bien el hecho de mantener un nivel de inventarios por sobre las 100 [kt Mo] no indica una restricción física de capacidad si tiene un alto impacto en el mercado del molibdeno. En particular, el análisis realizado resulta consistente al no afectar el precio de mercado (según se ha definido en los alcances de este trabajo), lo cual no se cumplirá al considerar niveles de inventarios que lleven a escenarios de escasez en el mercado global. De esta manera, se realizó un nuevo análisis, que limita la capacidad máxima del stock en cada año en función de la tonelaje de molibdeno transado a nivel mundial. En particular, se toman los casos en donde la capacidad de inventario en cada año se limita en un 5, 10 y 15% de la producción mundial a modo de que (teóricamente) la iniciativa no genere amplias variaciones en el precio de mercado:

**Tabla 14 Sensibilidad ante capacidad máxima por período en función de producción mundial**

Capacidad máxima anual de inventario (% Producción mundial)	Aumento de valor sobre caso base [%]	Aumento de valor sobre caso base [MSUD]
5%	2,7%	73,4
10%	5,4%	146,1
15%	8,0%	214,4



**Figura 53 Inventarios de molibdeno según restricciones de capacidad en función de producción mundial. Elaboración propia en base a resultados de modelo propuesto.**

De este modo, se aprecia que la estrategia de inventarios tiene la capacidad de crear valor aún bajo consideraciones límites, que permitiesen evitar una variación en el precio de mercado.

## 5.5. Comentarios del capítulo

El presente capítulo entrega los resultados de la optimización dinámica en cuanto a las ventas del concentrado de molibdenita en Chile durante los años 1984 a 2011. Si bien se presentan resultados prometedores, se debe tener presente que la presencia de Chile como un agente estratégico puede llevar a resultados de mayor valor en los resultados. Además, el objetivo principal del modelo es dar cuenta de una oportunidad de mejora, en cuanto a que existen alternativas al manejo que tiene este recurso para el país, que podrían incrementar el valor total del mineral y por consiguiente la eficiencia económica en la utilización del mineral.

En términos específicos, el modelo muestra que el costo de oportunidad de mantener material en stock no corresponde a un costo crítico ante las oportunidades que se logran en tener material en períodos de incrementos de precios. La estrategia se muestra beneficiosa para el caso del molibdeno en Chile, dado que los costos totales asociados a la producción específica del molibdeno es marginal respecto a los ingresos por su venta, condición que proviene de su calidad de subproducto. Además, el análisis de sensibilidad muestra que ante importantes variaciones en los parámetros de entrada se mantiene un significativo aporte de valor del modelo y la estrategia de inventarios. Además, considerando una restricción de capacidad que minimice impactos en el precio de mercado, se da el hecho de que el la alternativa propuesta sigue mostrando que existe una oportunidad de eficiencia para el molibdeno en Chile.

## 6. Discusión y análisis de políticas públicas para el molibdeno en Chile

### 6.1. Estudio de tributación para molibdeno

El estudio de tributación se centra en el modelo de impuesto óptimo de recursos naturales propuesto por los autores (Dasgupta, Heal y Stiglitz) en 1980. Aquí se destaca que en caso de conocer un camino óptimo de extracción, existe la posibilidad para que el Estado proponga una estrategia tributaria para lograr el camino previamente definido. Esto significa que la tributación puede ser utilizada como una herramienta para cambiar la utilización intertemporal de los recursos minerales.

Recordando lo previamente mencionado, el modelo se presenta de la siguiente manera:

$$\frac{d \ln(p \cdot (1 - \tau + \alpha \cdot \tau) - c \cdot (1 - \tau))}{dt} = \rho \quad (17.1)$$

Siendo  $\rho$  la tasa de descuento constante en el período,  $p$  al precio unitario de venta y  $c$  los costos marginales de extracción. Los valores de  $\{\alpha(t), \tau(t)\}$  se relacionan con el grado de extracción (similar a la depreciación de activos) y el régimen impositivo sobre las utilidades a través del período, respectivamente.

Las características propias del molibdeno en Chile permiten considerar un costo marginal como cero, lo que simplifica el modelo anterior. A su vez, el porcentaje de deducción por agotamiento ( $\alpha$ ) se puede mantener constante en el período de evaluación y permite obtener una ecuación diferencial para la carga impositiva:

$$\ln(p \cdot (1 - \tau + \alpha \cdot \tau)) = \rho \cdot t + C_0 \quad (29)$$

Para la evaluación, el valor de  $\alpha$  se fijó en 15%, tomando como referencia valores utilizados en E.E.U.U. para otros minerales<sup>12</sup>. De esta manera, la solución a la ecuación propuesta corresponde a:

$$\tau(t) = \frac{1}{1 - \alpha} - \frac{K_0 \cdot e^{\rho \cdot t}}{p \cdot (1 - \alpha)} \quad (30)$$

Los valores permiten calcular la tasa impositiva media (ponderada según la extracción de cada año) proveniente del camino óptimo dado por el modelo anterior. El valor alcanzado es de un 57,3%. Cabe destacar que el impuesto calculado corresponde a un impuesto sobre las utilidades por la venta del producto, por lo cual, respecto a Chile, se debe considerar que ya existe un impuesto que grava sobre las utilidades en un 17%, por lo cual se hace necesario un 40,3% extra para alcanzar el valor calculado como adición especial para los productos de molibdeno. En términos monetarios, el mayor cargo considerado en la carga impositiva se habría valorizado con cerca de 573 millones de US\$ anuales en promedio durante los últimos 10 años.

Cabe destacar otros aspectos positivos correspondientes a la implementación de una tributación especial para el molibdeno, fundamentada no sólo en el modelo propuesto anteriormente, sino que los fundamentos económicos mencionados en los antecedentes tributarios.

La existencia de la renta económica en minería es una realidad que se ve aumentada en los períodos de alzas de precios, debido a la renta por escasez generalizada (o de Hotelling). Así, se debe comprender a la renta económica como una utilidad que se

---

<sup>12</sup> En E.E.U.U. este valor es de 15% para minerales como el cobre, oro o plata. Fuente: Internal Revenue Service (IRS). El valor llega hasta 100% en caso de petróleo y gas natural.

genera por sobre los costos de los factores productivos, considerando cada uno de ellos, incluso el costo de inversión que se incurrió para generar el producto, manifestado por el retorno esperando por los inversionistas, o la tasa de rentabilidad esperada por el proyecto. A su vez, se debe entender el pago del capital como un estímulo o incentivo para que los capitalistas no varíen su decisión en cuanto a desarrollar o no un proyecto, es decir, que no sólo sean indiferentes frente a su mejor alternativa, sino que no la cambiarían. De esta manera se logra preservar uno de los principios en la creación de un régimen tributario que se relaciona a ser no distorsionante con las decisiones de los agentes económicos.

Para el caso del molibdeno en Chile, dada su naturaleza de subproducto, se da que los costos en que se incurren para generar el concentrado de molibdenita son mínimos y pueden considerarse cero sin pérdida de información en relación al precio del mismo (sólo flotación selectiva). Así, se logra un margen de utilidades holgado, por lo cual se puede estimar la renta económica para este producto en cerca de un 76,5% del precio de venta del concentrado, que se define al tomar un margen de utilidad de un 23,5% sobre la venta<sup>13</sup>.

Al valor considerado se le debe sustraer el porcentaje pagado como impuesto sobre las utilidades netas, de un valor de 17%<sup>14</sup>. Así, el margen considerado como renta económica para el molibdeno no capturado por el impuesto a las utilidades asciende a cerca de un 59,5%. De aquí debe nacer el cuestionamiento o necesidad por parte del Estado para implementar iniciativas tributarias para este metal.

La condición especial del molibdeno como subproducto que le permite extraerse de manera conjunta al cobre le otorga un funcionamiento distinto en cuanto a su capacidad para generar renta económica, lo que da pie a la necesidad de contar con una tributación especial independiente para este metal. Esta consideración permite la corrección efectiva mediante un impuesto de lo que es la renta económica en la minería de subproductos. Claramente, la literatura muestra la dificultad de ejercer tributos que graven sobre la renta económica, especialmente a la hora de cuantificar la renta por los costos de cada una de las minas, situación que se logra resolver para los sub productos en general y el molibdeno en particular. Otra dificultad se trata de cuantificar el nivel de utilidad razonable, lo cual puede determinarse a través del promedio de firmas en industrias relacionadas. No obstante, este podría incluso alcanzar valores mayores al

---

<sup>13</sup> Valor definido como el margen medio para metales y minerales industriales, después de impuesto. Fuente: Yahoo! ® Finance Septiembre 2011.

<sup>14</sup> La evaluación no considera cambios en la carga tributaria para empresas durante los últimos meses del 2012.



50% y aun así dejar espacio sobre un 33% por el cual se puede distribuir una tributación especial adicional.

En términos cuantitativos la tabla siguiente muestra el promedio que habría significado un royalty hacia el molibdeno (valores medios anuales de los últimos diez años) dependiendo del grado del impuesto sobre la renta económica (no capturada por el impuesto sobre las utilidades) previamente mencionada:

**Tabla 15 Captura de renta económica en la extracción del molibdeno**

<b>Porcentaje de captura de renta</b>	<b>Millones de US\$ anuales</b>
<b>10%</b>	84.656
<b>25%</b>	211.641
<b>50%</b>	423.281
<b>75%</b>	634.922
<b>100%</b>	846.562

El monto calculado anteriormente puede ser modificado al considerar que la mayor parte de la producción de molibdeno se da por parte de una empresa estatal, por lo cual la recaudación ya se estaría dando. Así, la tabla anterior muestra como habrían sido las recaudaciones por concepto de tributación de molibdeno, pero los aumentos netos en arcas fiscales se muestran a continuación:

**Tabla 16 Captura de renta económica en la extracción de molibdeno sin producción de Codelco**

<b>Porcentaje de captura de renta</b>	<b>Millones de US\$ extras anuales</b>
<b>10%</b>	21,4
<b>25%</b>	53,5
<b>50%</b>	107,6
<b>75%</b>	160,6
<b>100%</b>	214,1

El hecho formar una carga impositiva especial para el metal en estudio no sólo se basa en los principios de eficiencia económica y bajo costo administrativo (al sólo requerir los datos de producción y precio), sino que también en que logra ser equitativo a través de los miembros de la industria. Esto se permite gracias a que el impuesto diferencia sobre los productores que producen más o menos renta, dado que para todos los actores el molibdeno es un subproducto y sigue un mismo procesamiento. El impuesto podría ser considerado de alguna manera inestable, debido a que dependerá en gran medida de los movimientos del precio del molibdeno, lo cual podría ser considerado negativamente a la hora de evaluar los ingresos fiscales, sobre todo considerando la variabilidad que se ha visto sujeto en los años anteriores.

En línea con lo anterior, la posibilidad de una carga impositiva especial para el molibdeno debe ser considerada como un avance en materia de distribución, pues permite una transacción hacia el Estado de los ingresos proveniente de un subproducto minero, por lo cual se trataría de una carga no distorsionante en términos de generación de proyectos de producción de cobre.

Se debe destacar que el análisis impositivo requiere un estudio de equilibrio general, que considere la incidencia en todos los sectores, el cual se encuentra fuera de los alcances de este trabajo. El análisis de equilibrio general daría cuenta del efecto que tiene en la industria el tipo de carga tributaria propuesta, pues el hecho de aplicar un impuesto causa que en el mercado se establezca un nuevo equilibrio en producción y consumo. Según lo planteado por la teoría, un impuesto causaría una pérdida global de eficiencia, que viene dada por las formas de curva de oferta y demanda, junto con la burocracia del proceso gubernamental en la implementación de esta transferencia.

De acuerdo a la consideración anterior, el efecto virtuoso de la transferencia que ocurre con la implementación de un impuesto especial se puede diluir en el mercado, teniendo efectos perjudiciales de eficiencia o en las decisiones de distintos agentes económicos. Un hecho particular corresponde la realización de nuevos proyectos mineros, en los cuáles la presencia de un impuesto al molibdeno puede afectar de tal manera los ingresos que los flujos proyectados sean insuficientes para los inversionistas. Si bien existan razones que atenúan el efecto de pérdida de eficiencia, como lo son la naturaleza de la demanda de este mineral (inelástica) y de la oferta como subproducto (elástica), sólo un análisis general del equilibrio generado daría cuenta del real impacto de este tipo de política en el mercado nacional.

## **6.2. Implementación de inventarios**

Otra importante alternativa tratada, se relaciona con la posibilidad de mantener inventarios de molibdeno por parte del sistema estatal (dadas las economías de escala que se aprovechan según lo enunciado en los antecedentes). El valor que tiene esta iniciativa se relaciona directamente con los resultados del modelo descrito en el capítulo anterior, el cual da cuenta que la existencia de un stock permite aumentar los niveles de eficiencia en la utilización de molibdeno en el país al permitir que las ventas del subproducto se ligen más hacia los movimientos de precio que por las decisiones productivas del metal principal, en este caso, el cobre.

Las limitantes presentes sobre la utilización de inventarios radican en la capacidad máxima de los mismos, pues a pesar de que los costos medios de mantener un inventario no sean extremadamente elevados, la restricción sobre su cupo se muestra como un costo prácticamente inalcanzable. No obstante lo anterior, el manejo de stocks corresponde a una iniciativa de relativa simple implementación, que además, en caso

de darse por parte estatal, goza con una de las características dadas en los antecedentes sobre las economías de escala de los inventarios.

Según los resultados del modelo, se permiten esclarecer las variables de mayor relevancia en la evaluación, las cuales se dan principalmente por el lado del precio del molibdeno y los costos de inventarios. La importancia del precio radica en que define el costo de oportunidad financiera de mantener material en stock. Por otro lado, el costo de inventario se ve totalmente limitado por su máxima capacidad de almacenamiento, asociada al riesgo de mantenerlos por la variabilidad que exhibe el precio. En la realidad existen otras consideraciones operacionales, que llevan a maximizar la utilización de los sistemas de tostación para los concentrados. No obstante, privados están dispuestos a asumir el riesgo en bolsas o bodegas particulares en los casos de material que ya se encuentre refinado. El hecho de limitar el almacenamiento a través de los costos se aprecia de mayor manera al visualizar la solución del modelo al entregar costos de almacenamiento equivalentes a un 15% del valor de mercado del material stockeado. Bajo este cambio en los supuestos (modelo modificado), se produce un mayor aumento de valor (caso base):

**Tabla 17 Resultados de modelo modificado de agotamiento de molibdeno**

<b>Caso</b>	<b>Unidad</b>	<b>Beneficio descontado</b>
<b>Resultado modelo</b>	Millones de US\$	3.238,7
<b>Caso base</b>	Millones de US\$	2.691,0
<b>Valor agregado</b>	<b>Millones de US\$</b>	<b>547,7</b>

No obstante, la configuración anterior indica niveles de inventarios que alcanzan en su punto máximo más de 65 [kton] de molibdeno. El valor anterior se presenta como impracticable, debido al tamaño que alcanza el stock, equivalente a cerca de un tercio de la producción mundial:

**Tabla 18 Inventarios nacionales para modelo modificado**

<b>[kt Mo]</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>
<b>Stock final año</b>	12,18	28,58	45,30	65,00	65,00

Así, el potencial de mejora del modelo radica en la determinación sobre las capacidades máxima de inventario, lo que podría redundar en valores asimilables en la práctica.

Una consideración relevante que se debe incluir en la estrategia de inventarios corresponde al efecto que tiene la existencia de los mismos en el precio internacional. El trabajo no consideró la variación que se da en el precio producto de esta situación, considerando a los agentes como tomadores de precios. Así, un análisis completo

debería considerar el efecto que podría tener sobre el precio la menor disponibilidad física de los recursos de molibdeno, generando otra variable a mejorar en el marco de la agregación de valor.

Considerando lo anterior, en el análisis de sensibilidad realizado se muestra que al limitar los valores máximos del stock para evitar importantes variaciones de precio, la oportunidad de generar un aumento de valor de los recursos extraídos se sigue entregando.

### **6.3. Otras alternativas de política industrial**

Los mecanismos estatales que se disponen para posibilitar el crecimiento y la diversificación en torno a una determinada industria no se limitan sólo a los mencionados en los puntos anteriores. Si bien las alternativas propuestas previamente dan cuenta del interés que podría tener el Estado en desarrollar el enfoque nacional hacia el molibdeno, no demuestran un incentivo claro en un proceso de industrialización.

Una de las maneras descritas para promover y diversificar la industria nacional en torno al molibdeno radica en el desarrollo de productos de mayor valor agregado para el consumo. Este proceso de industrialización corresponde a una de las maneras más concretas de ampliar la matriz de producción chilena, encauzada en la exportación de materias primas. Tal como ha sido plasmado en el trabajo, el proceso de diversificación tiene un enorme impacto en el país, disminuyendo principalmente el riesgo y la inestabilidad económica, lo que redundaría en la forma que se desarrolla la sociedad y su entorno. De acuerdo a lo anterior, el proceso de industrialización del molibdeno abre la alternativa de crecer en la industria minera no ligada específicamente al cobre.

En este punto se debe destacar uno de los resultados más importantes que se destacan del estudio de mercado en cuanto a la demanda mundial de molibdeno, lo cual muestra que cerca del 84% del metal es utilizado con finalidades siderúrgicas. Lamentablemente, la industria siderúrgica es un área estandarizada, con un crecimiento limitado por las barreras de entrada asociadas a la producción de mineral de hierro, mercado dominado por países como Brasil, China, E.E.U.U e India. De este modo, las posibilidades de materializar una planificación estratégica en torno a esta área se vuelven menoscabadas.

Por otro lado, los usos del molibdeno no se limitan a usos genéricos o intermedios como la industria metalúrgica, sino que existen otros procesos de consumo que entregan un potencial atractivo que permitirían que nuestro país desarrolle una estrategia de crecimiento. Esta idea se da mayormente en los usos de molibdeno en la electrónica,

para elaboración de medios cerámicos y como ha sido difundido recientemente, en la nanotecnología (CIMAT 2010).

Los mercados mencionados no cuentan con un alto grado de perfeccionamiento y pueden significar una oportunidad para el país en la búsqueda del crecimiento y la diversificación de la matriz productiva. Iniciativas que apunten en mejorar la investigación y desarrollo a áreas novedosas son parte de las posibilidades que se abren mediante la aplicación de políticas industriales.

Finalmente, el proceso de industrialización o de utilización de recursos de molibdeno al interior del país se puede ver acelerado en caso de utilizar barreras a las exportaciones (como lo ha hecho China actualmente), no obstante, este tipo de situaciones es castigado duramente por los organismos internacionales, especialmente la Organización Mundial de Comercio, que podría aplicar penas en nuestro país que serían más costosas que los posibles beneficios que traería consigo el desarrollo de iniciativas industriales, sobre todo en cuanto no exista un claro desarrollo de una industria en base al molibdeno.

#### **6.4. Comentarios del capítulo**

El capítulo destaca algunas alternativas de políticas públicas que pueden ser realizadas considerando los atributos del molibdeno como sub producto del cobre en Chile. En primer lugar, se destaca el hecho de considerar una tributación especial para el molibdeno, que dada su naturaleza como sub producto genera una renta económica mayor que otros minerales, que llevaría a transferencias entre la industria al Estado minimizando la pérdida de eficiencia asociada al proceso tributario. Si bien se destaca la posibilidad de desarrollo de esta área, se recuerda el hecho de requerir un análisis de equilibrio general, que permita cuantificar los efectos que tendría en todo el mercado una política de este tipo.

La alternativa de inventarios se vislumbra como una alternativa promisoriosa para generar valor en el país, que se complementa con el hecho de que una empresa estatal mantiene la mayor parte de la producción nacional. No obstante, el estudio requiere profundizar en los efectos que puede tener sobre los mercados internacionales la implementación de inventarios en el país, principalmente sobre los precios.

Se destaca además en el capítulo el hecho de generar una política industrial en torno al molibdeno, situación que se ve limitada por su fuerte demanda como componente minoritario en aleaciones de acero.

## 7. Conclusiones

La importancia de los minerales en Chile se muestra sin duda en cualquier tipo de estudio. En particular el presente trabajo exhibe la relevancia que tiene el molibdeno y sus potenciales medidas para desarrollarlo a nivel país. A su vez, el trabajo ahondó sobre las características propias de esta industria extractiva y sus propiedades en el mercado nacional. Además, los antecedentes sobre la Economía de Minerales permiten dar cuenta de las limitantes que alejan a estos mercados del ideal que como sociedad se debería buscar, lo que induce a una mala utilización de los recursos. Esta hipótesis se vio reflejada con los resultados del modelo de agotamiento realizado. Bajo estas premisas el trabajo incluyó también las posibilidades de políticas públicas con las cuales se pueden buscar mejoras tanto de eficiencia económica como de distribución.

De acuerdo a los objetivos planteados para este trabajo, cabe destacar el análisis sobre los elementos principales que se asociado a la Economía de Minerales. Los antecedentes señalados revelan las limitaciones que poseen los modelos económicos al tratar de utilizarlos en los mercados de minerales. En particular las fallas asociadas a la problemática intertemporal y la no renovación de los minerales implican una utilización sub - óptima de los recursos mineros, lo que da pie a los distintos modelos de agotamiento que se estudian y presentan. En este aspecto, se destacan características únicas sobre la producción de minerales como subproductos, como lo es el caso del molibdeno en Chile.

De acuerdo a lo anterior, se destacan las alternativas de política minera que nacen como instrumentos de corrección o mejoramiento de las problemáticas asociadas al desarrollo de las industrias extractivas, lo que plasma la enorme capacidad de crecimiento que cuenta el país por su enorme riqueza mineral. En términos sociales y distributivos, la necesidad de tributación especial en minería se torna de primera necesidad en términos de estudio y debate en Chile.

El capítulo sobre la contextualización del mercado del molibdeno buscó caracterizar a los principales agentes involucrados, tanto por el lado de la producción como el consumo, junto a la posibilidad de encontrar distintas estructuras que diesen cuenta de algún patrón en el comportamiento del mercado. Así, la producción dio cuenta de poseer un mayor nivel de concentración geográfica, lo está asociado a la génesis mineralógica, por lo cual se concentra la producción en tres países principales, ocupando Chile el tercer lugar. La situación anterior plasma la importancia que tiene Chile en un mercado de constantes alzas durante los últimos años y que además consta de un atributo muy competitivo en costos por tratarse de una sub producción del cobre. En lo referente a exportaciones, aparece un nuevo actor (Molybmet), el cual sin ser un productor minero neto se presenta como el principal actor en el dominio de los productos de molibdeno. El dominio que puede tener la empresa mencionada en el

acontecer de la industria en Chile puede ser determinante y deben ser actores relevantes en cualquier tipo de iniciativa. Por otro lado, las componentes de la demanda dan cuenta de un mercado altamente enfocado hacia los usos en la industria siderúrgica, dejando otros usos en un segundo plano. Esta situación se vuelve relevante al considerar una política de diversificación, por tratarse de un mercado dominado por una demanda derivada del acero. En síntesis, el estudio entrega la posición determinante que tiene Chile en el mercado del molibdeno, lo cual permite asociar distintas posibilidades de desarrollo o crecimiento para esta industria en la cual se tienen importantes ventajas comparativas y de un importante valor para el país.

La sección del modelamiento en la utilización de recursos de molibdeno acoge la hipótesis sobre la existencia de fallas de mercado en la industria de minerales y en particular de los subproductos. Es por ello que la optimización de los mismos permite apreciar la posibilidad de mantener o generar valor por sobre lo realizado históricamente, es decir, se abre el espacio a enfocar la mirada en la industria del molibdeno. La importancia de los resultados no sólo se basa en el valor numérico, el cual puede variar según los supuestos utilizados, sino que en el hecho de validar la existencia de problemas en el uso de los recursos minerales de un subproducto del cobre, cómo se muestra en el modelo de inventarios. Además, permite fijar la mirada en un mineral que ha sido excluido de los breves debates sobre política pública asociada a los minerales y de este modo encumbrar la necesidad de desarrollo que poseen otros minerales de los cuales Chile se ha vuelto un actor relevante en los flujos de comercio internacional. Cabe destacar las limitaciones de la herramienta utilizada, en cuanto a los efectos que tiene en el sistema de precios del mercado. Así, el modelo podría tener un impacto considerable que afecte las hipótesis de equilibrio parcial consideradas, por lo cual sería necesario un análisis complementario que ratifique el efecto que puede tener una implementación de acuerdo al modelo propuesto.

En cuanto a la existencia de herramientas tributarias disponibles para los recursos minerales, el estudio realizado da cuenta del desarrollo de modelos e información que indican la necesidad de contar con un marco tributario específico que sea aplicable a las características especiales que se dan en la minería de recursos agotables. Especial importancia cobra este tema por las propiedades de los mercados de minerales que tienen la tendencia a crear y mantener rentas económicas a lo largo de extensos horizontes de tiempo. De este modo, las características de la extracción y procesamiento del molibdeno dan cuenta de una mayor generación de renta por los costos no incurridos. Además, favorece la mirada de generar mayor cantidad de información en torno a esta área al ser Chile un país que no cuenta con una tributación especial para el caso de la producción de subproductos minerales, ni para metales distintos del cobre. Esto permite abrir el debate en torno a la manera de lograr mejores niveles de eficiencia y distribución en pos del máximo beneficio social. Si bien los

modelos y análisis realizados dan cuenta de una posibilidad en esta materia, se debe tener en cuenta que el beneficio social requiere un análisis de equilibrio general y no sólo parcial como puede ser el caso del estudio. La situación anterior restringe el estudio, pues no se logran conocer los efectos globales que tiene una implementación tributaria especial, lo que requeriría un mayor nivel de estudio.

Por último, el estudio realizado fomenta la importancia que tiene el contar con una planificación estratégica como país hacia las distintas riquezas minerales que se tienen, enfatizando el caso del molibdeno por tratarse del segundo metal en importancia en las exportaciones tras el cobre. Los beneficios del cambio de paradigma se dan al contar con una diversificación del desarrollo industrial y la visión mono exportadora. A su vez, el trabajo cuenta con entregar fundamentos económicos hacia la aplicación de distintas y necesarias políticas mineras.



## 8. Bibliografía

Bardey, David, y H el ene Bonnet. *Teoría del control óptimo:  Una guía para principiantes!* Borrador de investigación, Bogotá: Universidad del Rosario, 2006.

Blossom, John W. «USGS: United States Geological Service.» 1998. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/molybdenum/470498.pdf> ( ltimo acceso: 29 de Mayo de 2012).

Campbell, Gary. «Theory of Mineral Demand.» En *Economics of the Mineral Industries*, 161-179. Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 1985.

Cerda, Aldo. *Introducción a la economía*. Santiago: Departamento de ingeniería industrial. Universidad de Chile, 2001.

CIMAT. *Difusión de tecnologías, aplicaciones y desafíos del molibdeno para la industria e investigadores a nivel nacional*. Proyecto de investigación, Santiago: INNOVA Chile, 2010.

Cisse, Ousmane. *A new era for molybdenum?* Annual Review, Dundee: CEPMLP Research, 2007.

Dasgupta, Partha, Geoffrey Heal, y Joseph Stiglitz. *The Taxation of Exhaustible Resources*. Working Paper Series, Cambridge: National Bureau of Economic Research, 1980.

Dasgupta, Partha, y Geoffrey Heal. *Economic Theory and Exhaustible Resources*. Cambridge: Cambridge University Press, 1978.

Dasgupta, Partha, y Geoffrey Heal. «The Optimal Depletion of Exhaustible Resources.» *The Review of Economic Studies*, 1974: 3-28.

Davis, Graham A. «Trade in mineral resources.» *Trade in Natural Resources: Challenges in Global Governance*. WTO Economic Research and Statistics Division, 2010. 1-41.

Davis, Peter. «On the role of empirical industrial organization in competition policy.» *International Journal of Industrial Organization*, 2011: 323-238.

Eggert, Roderick G. *Mineral market analysis*. Apuntes de clases, Santiago: Minerals economics program, 2011.

Engel, Eduardo. *Competencia Perfecta e imperfecta*. Santiago: Departamento de ingeniera industrial. Universidad de Chile, 1990.

Ferranti, David de, Guillermo Perry, Daniel Lederman, y William Maloney. *From Natural Resources to the Knowledge Economy*. Washington: The World Bank, 2001.

Field, Barry C. *Natural Resource Economics an Introduction*. New York: Mc Graw Hill, 2001.

Figueroa, Eugenio, y Enrique Calfucura. *Depreciación del capital natural, ingreso y crecimiento sostenible: lecciones de la experiencia chilena*. Documento de trabajo, Santiago: Banco Central de Chile, 2002.

Geman, Hélyette, y William Smith. «Theory of Storage, Inventory and Volatility in the LME Base Metals.» *Forthcoming in Resources Policy*, 2012.

Giralt, Xavier Martínez -. *Microeconomía Avanzada*. Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona, 2008.

Gordon, Richard L., y John E. Tilton. «Mineral economics: Overview of a discipline.» *Resources Policy*, 2007: 4-11.

Hamilton, Walton. «The Control of Strategic Materials.» *The American Economic Review*, 1944: 261-279.

Harman, Frank. *Natural Resource Economics*. Apuntes de clases, Santiago: Minerals economics program, 2007.

Harman, Frank, y Pietro Guj. «Mineral Taxation and Royalties.» En *Australian Mineral Economics - A Survey of Important Issues*, 171-185. Perth: AusIMM, 2006.

Hotelling, Harold. «The Economics of Exhaustible Resources.» *Journal of Political Economy*, 1931: 137-175.

Howie, Peter. «Mineral Demand - The theory in practice.» En *Australian Mineral Economics - A Survey of Important Issues*, 37-48. Perth: AusIMM, 2006.

IMOA. *IMOA: International Molybdenum Association*. [www.imoa.info](http://www.imoa.info) (último acceso: 29 de Mayo de 2012).

«IMOA: International Molybdenum Association.» 2005. [http://www.imoa.info/\\_files/Mo\\_chemical\\_applications\\_March05.ppt](http://www.imoa.info/_files/Mo_chemical_applications_March05.ppt) (último acceso: 30 de Mayo de 2012).

Ishihara, Takako. «Industrial policy and competition policy.» 2009. [www.jftc.go.jp/eacpf/05/jicatext/aug27.pdf](http://www.jftc.go.jp/eacpf/05/jicatext/aug27.pdf) (último acceso: 30 de Mayo de 2012).

Korinek, J., y J. Kim. «Export restrictions on strategic raw materials and their impact on trade.» *OECD Trade Policy Working papers, No. 95*. OECD Publishing, 2010.

Korinek, Jane, y Jeonghoi Kim. «Export Restrictions on Strategic Raw Materials and their impact on Trade.» *OECD Trading Policy Working Papers*, 2010.

Lall, Sanjaya. «Reinventing industrial strategy, the role of government policy in building industrial competitiveness.» *United Nations Conference on trade and development*. New York and Geneva: United Nations G24, 2004. 1-24.

Maxwell, Philip. «Mineral supply - Exploration, production, processing and recycling.» En *Australian Mineral Economics - A Survey of Important Issues*, 49-58. Perth: AusIMM, 2006.

Maxwell, Philip. «Minerals Economic - An Introduction.» En *Australian Mineral Economics - A Survey of Important Issues*, 1-4. Perth: AusIMM, 2006.

Maxwell, Philip. «Trade in Minerals.» En *Australian Mineral Economics - A Survey of Important Issues*, 27-34. Perth: AusIMM, 2006.

Maxwell, Philip, y Pietro Guj. «Mineral Policy - An Introduction.» En *Australian Mineral Economics - A Survey of Important Issues*, 153-159. Perth: AusIMM, 2006.

Mayor, Fernando. *Análisis de la industria del Renio y propuestas de estrategias de desarrollo para la industria nacional*. Memoria para optar al título de ingeniero civil industrial, Santiago: Universidad de Chile, 2010.

Newbery, David M. G., y Joseph E. Stiglitz. «Optimal commodity Stock-Piling Rules.» *Oxford Economic Series*, 1982: 403-427.

Nichols, Albert L., y Richard J. Zeckhauser. «Stockpiling strategies and cartel prices.» *The Bell Journal of Economics*, 1977: 66-96.

OECD. «Economic impacts and policy objectives of export restrictions.» *OECD workshop on raw material*. París: BIAC Discussion paper, 2009. 1-7.

Pape, Edgar. *Análisis de la industria del molibdeno y sus determinantes futuras*. Memoria para optar al título de ingeniero civil industrial, Santiago: Universidad de Chile, 2005.

Paulus, Moritz, Johannes Trüby, y Christian Growitsch. «Nations as strategic players in global commodity markets, evidence from world coal trade.» *EWI Working Paper*. Cologne: Institute of Energy Economics, 2011. 1-29.

Peterson, Frederick M., y Anthony C. Fisher. «The Exploitation of Extractive Resources A Survey.» *The Economic Journal*, 1977: 681-721.

Pindyck, Robert S. «The Optimal Exploration and Production of Nonrenewable Resources.» *Journal of Political Economy*, 1978: 841-861.

Porter, Michael E. «The five competitive forces that shape strategy.» *Harvard Business Review*, 2008: 1-18.

Rodrik, Dani. «Industrial policy for the twenty-first century.» *Harvard Kennedy School*. 2004. <http://www.hks.harvard.edu/fs/drodrik/Research%20papers/UNIDOSep.pdf> (último acceso: 30 de Mayo de 2012).

Rodrik, Dani. *Normalizing industrial policy*. Working paper, Washington: The Commission on Growth and Development, 2008.

Shields, John. «IMOA: International Molybdenum Association.» 1995. [http://www.imoa.info/\\_files/brochures\\_articles/Applications\\_Mo\\_Metal.pdf](http://www.imoa.info/_files/brochures_articles/Applications_Mo_Metal.pdf) (último acceso: 30 de Mayo de 2012).

Slade, Margareth E. «Market Structure, Marketing Method, and Price Instability.» *The Quarterly Journal of Economics*, 1991: 1309-1304.

Slade, Margareth E. «Strategic market with customer rationing, the case of primary metals.» *The Canadian Journal of Economics*, 1991: 70-100.

Slade, Margareth, y Henry Thille. «Wither Hotelling: Tests of the Theory of Exhaustible Resources.» *Annual Review of Resource Economics*, 2009: 239-260.

Solow, Robert M. «The Economics of Resources or the Resources of Economics.» *The American Economic Review*, 1974: 1-14.

Stiglitz, Joseph. «Growth with Exhaustible Natural Resource: Efficient and Optimal Growth Paths.» *The Review of Economic Studies*, 1974: 123-137.

Stiglitz, Joseph. «Monopoly and the Rate of Extraction of Exhaustible Resources.» *The American Economic Review*, 1976: 655-661.

Tilton, John. *On Borrowed Time? Assessing the threat of mineral depletion*. Washington: Resources for the Future Press, 2002.

Tilton, John. «The Metals.» En *Economics of Mineral Industries*, 383-415. Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 1984.

## **ANEXO A**

### **Marco teórico micro económico**

El concepto de economía proviene del griego *oikos* que representa a quien “administra la casa” y es la ciencia que se enfoca en la producción, intercambio, distribución y consumo de bienes y servicios. En particular, el estudio de la microeconomía se centra en tres elementos: bienes y precios, agentes individuales y el proceso de toma de decisiones de los agentes (Cerdea 2001).

Entre las distintas visiones que existen sobre la economía o el manejo de los recursos, se destaca la de mercado, que involucra la relación entre los agentes económicos que se desenvuelven en un sistema de precios fijados de manera exógena por la libre interacción de los agentes económicos involucrados.

La teoría microeconómica en mercados de competencia perfecta, se centra en 3 puntos principales: la teoría del consumidor, la teoría de la firma y la teoría del equilibrio general.

A su vez, se entregan las bases sobre el concepto de elasticidad utilizado en micro economía, el cual se utilizará a lo largo de este trabajo.

## **A.1 Teoría del consumidor**

Uno de los estudios relevantes de la demanda se centra en el conocimiento de las preferencias de los consumidores, la cual se basa en una aproximación que permite valorizar o cuantificar los gustos de los consumidores en términos relativos en lugar de absolutos. Así, el consumidor se avoca a decidir su preferencia entre distintas combinaciones de dos bienes X e Y, llamadas canastas y denotadas como el vector  $(x_i, y_i)$ , que muestra la cantidad consumida de cada bien. De este modo, frente a dos canastas de consumo  $(x_1, y_1)$  y  $(x_2, y_2)$ , se debe decidir entre la preferencia de alguna de ellas dos o la indiferencia de una con otra.

La siguiente componente de la teoría del consumidor corresponde al concepto de función de utilidad (denotada por la letra U), la cual demarca la preferencia que se posee frente a dos determinadas canastas de bienes. En particular, se dirá que un agente *i* prefiere la canasta 1 por sobre 2 si se cumple que:  $U_i(x_1, y_1) > U_i(x_2, y_2)$ . A partir de la función utilidad es posible generar la curva de indiferencia (C), que demarca el lugar geométrico de todas las canastas de bienes que entregan la misma utilidad al consumidor considerando una canasta  $(x_0, y_0)$ . Formalmente:

$$C = \{(x, y): U(x, y) = U(x_0, y_0)\}$$

En el uso de las curvas de indiferencia se destacan otras características adicionales: si *x* e *y* son dos bienes económicos, el consumir mayor cantidad de *x* o de *y* manteniendo



fija la otra cantidad, permitirá alcanzar un mayor nivel de utilidad o una mayor curva de indiferencia. Lo anterior permite concluir que las funciones de utilidad son crecientes en el consumo de bienes económicos y además se supondrá que no existe un punto de saturación o saciedad, es decir, que siempre se querrá consumir más.

A la hora de analizar la forma en que se asignan los recursos para conseguir distintos niveles de satisfacción, se debe incluir la limitación que manifiesta la escasez de recursos, que en el caso de los consumidores corresponde a la restricción presupuestaria, es decir, la cantidad fija de capital que puede destinar el consumidor a la obtención de bienes o servicios en un período de tiempo. Considerando los precios de los bienes X e Y, a través de las variables  $p_x$  y  $p_y$ , respectivamente, y los ingresos del consumidor ( $I$ ), se debe cumplir que la cantidad consumida de cada bien no sobrepase la restricción presupuestaria:

$$p_x \cdot X + p_y \cdot Y \leq I$$

Teniendo en cuenta la racionalidad de los agentes económicos, el consumidor buscará elegir la canasta o combinación de bienes que le permita un mayor nivel de utilidad, decisión llamada como principio de maximización de utilidades. Matemáticamente, el problema se presenta como:

$$\max_{x,y} U(x,y)$$

$$s. a. p_x \cdot X + p_y \cdot Y \leq I$$

Del supuesto de no saturación se tendrá que se gastará todo el ingreso, por lo tanto para alcanzar una solución eficiente del problema, se tiene que:

$$\max_{x,y} U(x,y)$$

$$s. a. p_x \cdot X + p_y \cdot Y = I$$

De esta manera, es posible definir la cantidad demandada de ambos bienes por cada persona (demanda individual), donde la solución al problema planteado debe ser tal que:

$$\frac{\frac{\partial U}{\partial x}}{\frac{\partial U}{\partial y}} = \frac{p_x}{p_y}$$

Que se define como la tasa de sustitución en el consumo (TSC).

Una vez determinada la demanda individual, se determina la demanda global como la suma horizontal de cada individuo, es decir, se agregan las cantidades demandadas por cada consumidor para distintos precios.

En lo que respecta a los minerales, la demanda se presenta más bien como una demanda derivada, que indica que los minerales se consumen como parte de una función de producción de las firmas, donde su utilidad depende del producto o servicio final que se desee producir. Este tema se explicará más adelante.

## **A.2 Teoría de la firma competitiva**

El estudio de la teoría de la firma permite comprender la forma en que se genera la función de oferta de un determinado bien. En términos simples, toda firma utiliza ciertos insumos o factores de producción (típicamente trabajo, capital y recursos naturales), los cuales pasan por un proceso de transformación para luego ser vendidos a los consumidores. Una colección de firmas que producen un mismo bien se define como una industria y al suponer los bienes como homogéneos, la oferta total de la industria se determina de forma agregada por la producción de cada firma.

Tal como se presentó en la teoría del consumidor, los agentes económicos (en este caso las firmas) toman decisiones racionales, es decir, buscan maximizar sus utilidades a partir de ciertas variables de decisión que tenga en un determinado mercado. Además de esto, para catalogar una industria como perfectamente competitiva se han definido algunos supuestos:

- En primer lugar, los bienes producidos deben ser idénticos, o equivalentemente que el bien que produce la industria es homogéneo (no existe diferenciación de productos).
- Las firmas maximizan utilidades en cada período.
- Las firmas son agentes tomadores de precios, es decir, que sus acciones no tienen efecto sobre el precio de los insumos utilizados ni sobre el precio de venta de los bienes producidos.
- Las transacciones entre compradores y productores no tienen costo.

En el modelo de competencia perfecta las firmas determinan el nivel de producción que maximiza sus utilidades (ingresos menos costos), considerando un precio exógeno, que viene dado por el mercado. Se debe destacar que el nivel de producción ( $q$ ) que determine la firma ocurre en un horizonte temporal definido. De este modo, de manera sencilla y considerando una firma que sólo produce un bien con un precio de venta  $p$  y

una función de costos  $C$  (dependiente sólo del nivel de producción  $q$ ) se tiene que la firma resuelve:

$$\max_q \pi(q) = p \cdot q - C(q)$$

Destacando que el problema se resuelve para un período de tiempo determinado.

La solución se alcanza cuando  $p = \frac{dC}{dq}$ , donde la derivada de los costos se denomina costo marginal de la firma y refleje el costo adicional por producir una unidad del bien.

Sin embargo, para poder llegar a este resultado, la firma debe tener un adecuado conocimiento de su función de costos, la cual se define a partir de la función de producción que esta posea.

La función de producción de una firma corresponde a la síntesis de la tecnología que posee una firma para producir un bien. Esta función asocia una combinación de insumos o factores de producción a una cantidad de bienes que se pueden producir con la tecnología disponible. Formalmente, una función de producción se presenta de la siguiente manera:

$$q = F(K, L, T, \dots)$$

En la cual la variable  $q$  denota la cantidad de unidades producidas y  $K, L, T$  corresponden a los factores de producción, típicamente identificados como capital (físico o financiero), trabajo y recursos naturales. Generalizando el problema, considerando  $n$  factores de producción representados por el vector de las cantidades  $f$  y la función de costos totales del factor  $i$   $C_i$ , el principio de maximización de utilidades para la firma considerando su función de producción  $q$  se expresa como:

$$f = (f_1, \dots, f_i, \dots, f_n)$$

$$\max_{f_i} \pi(f) = p \cdot q(f) - \sum_{i=1}^n C_i(f_i)$$

El óptimo de la combinación de factores para un nivel de producción dado, se alcanza cuando el precio del bien por la productividad marginal del factor ( $PMg$ ), que corresponde al beneficio marginal que entrega de cada factor, se iguala a su costo marginal:

$$p \cdot \frac{\partial q(f)}{\partial f_i} = p \cdot PMg_i = \frac{dC_i}{df_i} = c_i(f_i)$$

De acuerdo a lo anterior, se tiene que cada firma buscará maximizar sus utilidades, minimizando los costos para el mayor nivel de producción posible. Así, en el punto óptimo se cumple:

$$\frac{PMg_i}{PMg_j} = \frac{c_i(f_i)}{c_j(f_j)}$$

Que se define como la tasa de sustitución tecnológica (TST).

Si se consideran sólo 2 factores de producción (K y L), con costos marginales constantes (r y w, respectivamente) se tendrá que el punto óptimo se alcanza cuando la pendiente de la curva de isocostos (símil a la restricción presupuestaria en el caso del consumidor) se iguala a la pendiente de las isocuantas de producción (como era el caso de las curvas de indiferencia en el punto anterior), tal como se muestra en la siguiente figura:

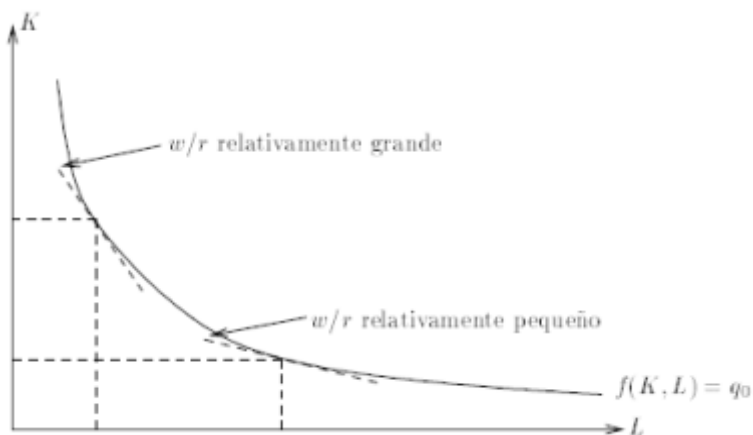


Figura A-1 Punto óptimo de producción. Fuente: (Cerde 2001)

Finalmente, luego de que cada firma define su nivel de producción óptima, la oferta total de la industria se determina a partir de las cantidades agregadas (de manera horizontal) para cada distintos niveles de precios.

### A.3 Teoría del equilibrio general

La idea de equilibrio conlleva una idea implícita de que las fuerzas dominantes del mercado se compensan, de modo que ninguna tiene incentivos para desviarse de las decisiones que han tomado.

En un mercado competitivo, el equilibrio queda definido por un precio y una cantidad transada en el mercado, que además cumple con la condición de eficiencia sobre el uso de los factores, es decir, que una redistribución del uso de los factores utilizados no conlleva un mayor nivel de bienestar en la sociedad en su conjunto. En esta situación se puede diferenciar entre el horizonte temporal que se considere, dependiendo el equilibrio entre corto y largo plazo. El equilibrio de corto plazo queda determinado por la intersección de las curvas de oferta y demanda, mientras que el equilibrio de largo plazo se produce imponer el hecho de que las rentas económicas se extingan, entendiendo la renta económica como el valor en exceso que se obtiene por sobre el valor medio del costo de todos los factores necesarios para producir un bien. Este punto se tratará en más detalle, por ser una de las grandes características de los mercados de minerales.

Otro concepto importante relativo al equilibrio de mercado corresponde a la eficiencia de Pareto. Así, se dice que una sociedad asigna sus recursos de manera Pareto – eficiente si el hecho de mejorar el bienestar económico de un individuo necesariamente significa perjudicar a otro. La idea de que un mercado competitivo asigna eficientemente los recursos se sustenta en condiciones relacionadas a los antecedentes previamente mencionados, tanto en la demanda del consumidor, como en la teoría de la firma. Por un lado la eficiencia del consumo proviene del equilibrio entre las tasas de sustitución en el consumo de todos los bienes y la eficiencia de producción no depende ni del bien producido ni de la firma que lo haga, además, la productividad marginal de un insumo en la producción de un bien determinado tampoco depende de la firma que lo haga. Finalmente, para que una sociedad asigne eficientemente según Pareto sus recursos, la tasa de sustitución en el consumo se igualará a la tasa de sustitución de producción en las firmas.

Cada uno de los antecedentes mencionados anteriormente cobra relevancia para comprender como los mercados competitivos asignarán eficientemente los recursos de los que dispone una economía, por lo tanto, una desviación de los supuestos de esta teoría podría provocar que la condición de optimalidad económica o eficiencia de Pareto no se vea reflejada en lo que ocurra realmente, por lo cual la sociedad se enfrente a una situación de ineficiencia o, en otro términos, una inadecuada utilización de los recursos existentes.

#### A.4 Definición de elasticidad

Parte del análisis económico se sustenta en una importante herramienta, correspondiente al concepto de elasticidad. Esta variable indica la variación de una variable ante variaciones de otra, lo que permite conocer la manera en que se ligan los distintos componentes de la economía y la magnitud en que lo hacen.

Formalmente, dadas dos variables  $x$  e  $y$ , donde  $y$  es función derivable de  $x$ , se define la elasticidad ( $\varepsilon$ ) de  $y$  respecto de  $x$  en el punto  $(x, y)$  como.

$$\varepsilon_{y,x} = \frac{\partial y}{\partial x} \cdot \frac{x}{y}$$

La elasticidad se puede interpretar como la variación porcentual de  $y$  cuando  $x$  varía un 1%. Algunas elasticidades relevantes en el estudio corresponden las siguientes:

$$\text{Elasticidad precio de la demanda: } \varepsilon_{Qd,P} = \frac{\partial Qd}{\partial P} \cdot \frac{P}{Qd}$$

$$\text{Elasticidad precio de la oferta: } \varepsilon_{Qo,P} = \frac{\partial Qo}{\partial P} \cdot \frac{P}{Qo}$$

Las dos relaciones anteriores muestran la variación en la cantidad ofertada o demandada de un determinado bien ante variaciones de su propio precio. Esta se cataloga como inelástica en caso de que su valor sea menor a 1 o elástica en el caso de que sea mayor.

$$\text{Elasticidad ingreso de la demanda: } \varepsilon_{Qd,I} = \frac{\partial Qd}{\partial I} \cdot \frac{I}{Qd}$$

La elasticidad anterior relaciona los cambios que ocurren en la cantidad demandada ante variaciones en el ingreso de los consumidores (o capacidad de compra).

$$\text{Elasticidad precio cruzado de la demanda: } \varepsilon_{Qd_A,P_B} = \frac{\partial Qd_A}{\partial P_B} \cdot \frac{P_B}{Qd_A}$$

Finalmente, la elasticidad cruzada de la demanda indica los cambios que ocurren en la cantidad demandada de un bien A, ante cambios de precio de un bien B. Esta medición permite identificar bienes sustitutos (valores positivos) o complementarios (valores negativos).

## **ANEXO B**

### **Teoría del control óptimo**

## B.1 Principio del máximo<sup>15</sup>

La estática comparada nos muestra las tasas de cambio instantáneo de una variable dado el cambio de otra ceteris paribus, por lo cual es utilizada para analizar hipótesis estáticas.

En ciertos problemas, sin embargo, el análisis de movimientos instantáneos de la variable de elección es inadecuado. En el caso de la teoría del capital (que es un bien durable) donde la decisión sobre cambiar el nivel del flujo de capital es importante, este problema se vuelve más evidente. Además, lo que es interesante es el cambio en la utilización de los recursos a través del tiempo más que la dirección inicial del cambio.

Estas decisiones son inherentemente dinámicas. El sendero varía con decisiones tomadas hoy. Las decisiones del presente afectan al futuro. Una técnica para solucionar estos problemas es la teoría del control óptimo.

La teoría del control óptimo permite resolver problemas dinámicos de naturaleza muy variada, donde la evolución de un sistema que depende del tiempo puede ser controlada en parte por las decisiones de un agente. Así, se hablará de un sistema dinámico general sin hacer referencia a una situación precisa y donde existe un agente denominado planificador, que toma las decisiones.

En cada momento  $t$  el sistema puede estar descrito por un vector de estado  $X \in R^n$ . El planificador escoge igualmente en cada momento un vector de control  $U \in R^n$ . La relación que une el vector de control al vector de estado está descrita de la siguiente manera:

$$\dot{x}(t) = m(u(t), x(t), t)$$

Opciones diferentes del valor de la variable de control implican trayectorias diferentes del sistema dinámico. El planificador debe tener en cuenta esta restricción para determinar el vector de control que maximice su objetivo intertemporal:

$$V = \int_{s=0}^{s=T} F[u(t), x(t), t] dt$$

---

<sup>15</sup> Bardey, David, y Hélène Bonnet. *Teoría del control óptimo: ¡Una guía para principiantes!* Borrador de investigación, Bogotá: Universidad del Rosario, 2006.



Para el problema de maximización se considerarán el horizonte, las condiciones iniciales y finales como dadas. El planificador dispone de un vector de estado inicial predeterminado ( $x_0$ ). El problema de control óptimo consiste entonces en establecer la trayectoria óptima, es decir, la trayectoria que maximiza el objetivo del planificador, teniendo en cuenta la relación que une el vector de estado al vector de control. El principio del máximo elaborado por Pontryagin permite descomponer este problema en dos etapas.

La primera consiste en devolverse a un problema de optimización estática a cada instante  $t$ , mientras que la segunda etapa es la solución de un sistema de ecuaciones diferenciales definido por las condiciones necesarias de optimalidad del problema estático.

La primera etapa reposa sobre la lógica siguiente: a cada instante  $t$ , el planificador dispone de un vector de estado  $x(t)$  y debe escoger un vector de control  $u(t)$  que determina simultáneamente el valor del objetivo al instante  $t$ , dado por  $F_t(\cdot)$  y la variación del vector de estado definido por  $\dot{x}(t)$ . La elección del vector genera entonces dos efectos: un primero efecto, inmediato a través del valor instantáneo del objetivo, un segundo, al nivel de cambios de la variable de estado. Intuitivamente se sabe que si el vector de control es escogido para maximizar sólo el valor instantáneo del objetivo, esta escogencia tiene poca probabilidad de ser óptima.

Se presenta entonces un arbitraje en la determinación del vector de control óptimo entre el valor que uno puede asignar al objetivo instantáneo y la trayectoria tomada por la variable de estado que tendrá un efecto sobre los valores futuros de la función objetivo.

La variación de la variable de estado puede entonces ser interpretada como una restricción. De manera similar al método utilizado para resolver un problema de optimización estática, este arbitraje es tenido en cuenta asociando un precio a esta restricción. Técnicamente ésta consiste en escribir una función objetivo modificada que tiene en cuenta estos dos efectos.  $q(t)$  Designa el vector de multiplicadores (o de precios) asociado a las variaciones del vector de estado (en el momento  $t$ ), después la determinación del vector de control. Este objetivo modificado, llamado hamiltoniano, está definido de la siguiente manera:

$$H_t^c = H^c(u(t), x(t), q(t), t) = F_t(u_t, x_t) + q(t)m(u(t), x(t)) = F_t + q(t)\dot{x}(t)$$

El primer componente del Hamiltoniano designa el efecto del vector de control sobre el valor instantáneo del objetivo. El segundo componente expresa el aumento futuro del objetivo seguido a la variación del vector de estado. Un Hamiltoniano, es entonces la suma del valor instantáneo del objetivo y de los valores futuros de este objetivo

teniendo en cuenta la variación del vector de estado, ponderada por el precio asociado a esta variación.

El arbitraje anteriormente descrito aparece claramente al momento de escribir la condición de primer orden con respecto al vector de control.

$$\frac{\partial H_t^c}{\partial u_t} = 0 \Rightarrow \frac{\partial F_t(u_t, x_t)}{\partial u_t} + q(t) \frac{\partial m(u_t, x_t)}{\partial u_t} = 0$$

La condición muestra que el planificador debe arbitrar entre las ganancias inmediatas generadas por el valor del objetivo al instante  $t$  y la pérdida generada por la reducción de oportunidades futuras, expresado a través de los valores futuros del vector de estado.

Sin embargo, el arbitraje que se acaba de exponer sólo es óptimo si el vector de multiplicador  $q(t)$  es definido correctamente, es decir, de manera que refleje el impacto marginal del vector de estado sobre el objetivo del planificador. Se vuelve entonces intuitivo que el vector de multiplicadores debe verificar:

$$q(t) = \frac{\partial V^c(x, t)}{\partial x_t}$$

Dicho de otra forma, el multiplicador debe ser igual al valor marginal del objetivo con respecto a la variable de estado. Adicionalmente, la variación del valor objetivo, seguido de una variación de la variable de estado en el tiempo está dada por:

$$\frac{d}{dx} [x(t)q(t)] = q'(t)x(t) + x'(t)q(t)$$

Es conveniente maximizar el valor de esta variación de la variable de estado y del objetivo instantáneo  $F_t(u_t, x_t)$  con respecto a la variable de estado. Es decir, maximizar la siguiente expresión respecto a  $x_t$ :

$$F_t(u_t, x_t) + q'(t)x(t) + x'(t)q(t)$$

Escrito de otra forma,

$$F_t(u_t, x_t) + q'(t)x(t) + m(u(t), x(t), t)q(t)$$

Se obtiene,

$$\frac{\partial F_t(u_t, x_t)}{\partial x_t} + q(t) \frac{\partial m_t}{\partial x_t} + q'(t) = 0$$

Lo cual se conoce generalmente bajo la forma:

$$\dot{q}(t) = - \frac{\partial H_t^c}{\partial x_t}$$

## **ANEXO C**

### **Antecedentes del mercado del renio**

## **C.1 Características del renio**

El renio se caracteriza por ser un metal con un altísimo punto de fusión, llegando hasta los 3.186°C. Esta característica se agrega a que corresponde a un elemento extremadamente duro, resistente al desgaste y a la corrosión.

Además de las propiedades mencionadas, el renio debe caracterizarse por su presencia en la corteza terrestre, pues corresponde a un elemento muy escaso, con concentraciones de menos de 0,001 [ppm] y altamente disperso. Así, la mayor presencia de renio se da en asociación a la molibdenita, alcanzando concentraciones de hasta 20 [ppm] en este mineral.

Los usos principales del renio se encuentran altamente especializados, principalmente bajo la forma de superaleaciones. Las súper aleaciones que se generan a partir del renio pueden variar entre aquellas de tercera generación, que contienen un 3% de renio, mientras que las de cuarta generación llegan a contenidos de 5% y 6%.

En la industria aeronáutica, el uso de renio se traduce en mayor eficiencia en el uso de combustible, menores emisiones y una mayor vida útil. De esta manera, la mayor parte del renio se asocia a la industria aeronáutica, formando aspas de turbina de avión, termocuplas de alta temperatura y para cohetes espaciales. Otra área relevante corresponde a su empleo como catalizador en la producción de gasolinas de alto octanaje libre de plomo.

## **C.2 Producción de renio**

Como se ha mencionado previamente, la obtención del renio se realiza desde su presencia más abundante, es decir, desde minerales de molibdenita. La obtención se logra a partir de los gases del proceso de tostación de molibdenita, los cuales pasan por un proceso de lavado para conseguir una solución rica en  $\text{Re}_2\text{O}_7$ . La solución del óxido de Renio se concentra posteriormente para producir perrenato de amonio ( $\text{NH}_4\text{ReO}_4$ ), desde el cual se obtiene el renio metálico en polvo.

En términos de producción primaria, se destaca la participación de la empresa Molymet S.A., según información de Roskill para el año 2009, la cual asciende a sobre un 56%.

Otros principales productores primarios se aprecian en la siguiente tabla:

Tabla B-1 Principales productores primarios de renio. Fuente: Roskill 2010

Compañía	País	Capacidad (kg/año)	Participación (%)
<b>Molybdenum</b>	Chile	40.000	56,1%
<b>Red Met</b>	Kazajstán	8.250	11,6%
<b>FCX</b>	EE.UU.	8.000	11,2%
<b>KGHM Ecoren</b>	Polonia	5.000	7,0%
<b>Navoi</b>	Uzbequistán	5.000	7,0%
<b>Jiangxi Copper</b>	China	1.800	2,6%
<b>Otros</b>	CIS	3.225	4,5%
<b>Total</b>		<b>71.275</b>	<b>100%</b>

A su vez, existe un porcentaje de producción secundaria, proveniente del reciclaje del renio principalmente en Alemania y Estados Unidos, tal como se muestra a continuación:

Tabla B-2 Principales productores secundarios de renio. Fuente: Roskill 2010

Compañía	País	Capacidad (kg/año)	Participación (%)
<b>W.C. Heraeus</b>	Alemania	11.000	37,7%
<b>Gemini Industries</b>	EE.UU.	3.700	12,7%
<b>H.C. Starck</b>	Alemania	3.600	12,3%
<b>Recapture Metals</b>	EE.UU.	3.000	10,3%
<b>Toma Group</b>	Estonia	2.400	8,2%
<b>Buss &amp; Buss</b>	Alemania	2.000	6,8%
<b>AS Nordmet</b>	Rusia / Estonia	2.000	6,8%
<b>BASF / Englehard</b>	EE.UU.	1.000	3,4%
<b>Colonial Metals</b>	EE.UU.	500	1,7%
<b>Total</b>		<b>29.200</b>	<b>100%</b>

### C.3 Consumo del renio<sup>16</sup>

Las principales industrias consumidoras de renio corresponden a aquellas asociadas a las turbinas de avión y a la refinación del petróleo:

<sup>16</sup> Fuente: filial Promoly de Codelco.

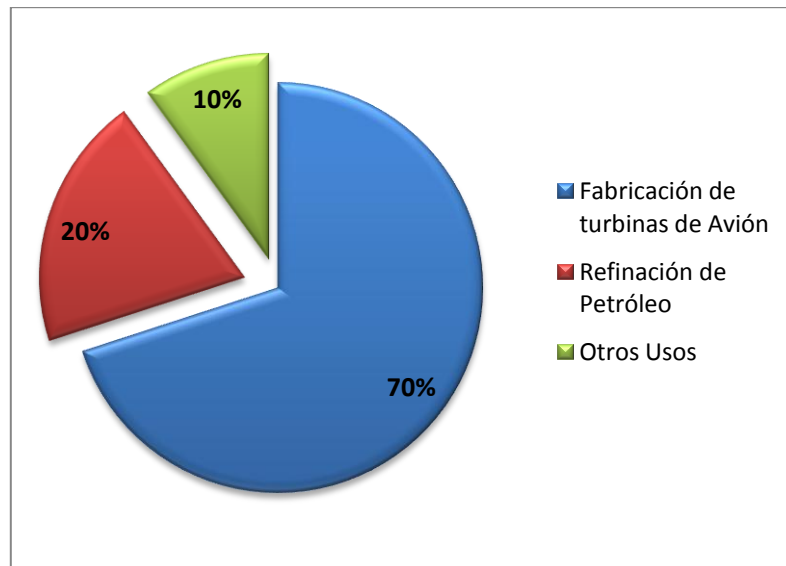


Figura C-1 Industrias consumidoras de renio. Fuente Roskill 2010.

El renio se utiliza mayormente en la creación de super aleaciones (70% del total), destacando la aviación como su principal uso en este aspecto. No obstante, se presenta también en las turbinas industriales de gas.

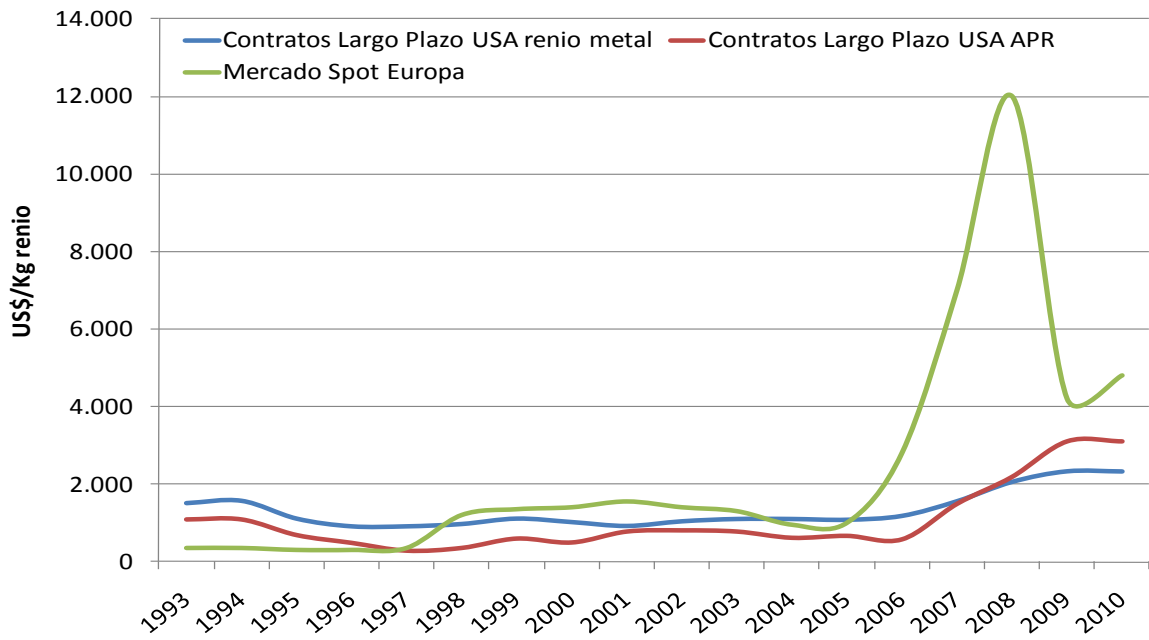
En la industria de la aviación (sobre el 75% del uso de las super aleaciones), los principales consumidores corresponden a las compañías General Electric, Pratt & Whitney y Rolls Royce. Por otro lado en el área de las turbinas industriales de gas, el principal consumidor corresponde a la compañía Siemens, quien concentra cerca de un 80% de esta industria.

En lo que respecta a la industria de catalizadores para la industria del petróleo, los principales consumidores corresponden a las compañías Axens, BASF, Criterion, ExxonMobil, Indian Petrochemicals, Sinopec y UOP.

En lo referente a la comercialización del renio, éste se compra bajo contratos a precio fijo que duran entre 3 a 5 años.

#### C.4 Historia de precios del renio

Como se mencionó previamente, el renio se comercializa principalmente por contratos a precio fijo. Así, el precio del renio se ha mostrado relativamente estable a lo largo de los últimos 20 años, no obstante, la crisis económica de los últimos años consiguió dar un aumento en los precios del mismo:



**Figura C-2 Precio histórico del renio. Fuente: GPCDM 2010 y Roskill 2010.**

Según los estudios de Roskill, el precio que permitiría un mercado balanceado, con buen retorno para los productores y bajo incentivo a la sustitución, estaría en el orden de 5.400 [US\$ /kg].



## **ANEXO D**

### **Modelo asociado a la utilización de molibdeno en Chile**

## D.1 Extracción molibdeno Chile 1984 - 2011

	Unidades	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Producción Andina	[kt Mo]	0,28	0,63	0,99	1,18	1,53	1,67	1,29	1,21	1,37	1,68	1,70	1,66	2,00	1,75
Producción El Teniente	[kt Mo]	3,12	4,44	4,24	4,02	3,19	3,18	2,63	2,28	2,44	2,04	2,24	2,03	2,65	3,18
Producción Codelco Norte	[kt Mo]	12,08	11,87	10,09	10,45	9,99	11,03	9,33	10,29	10,20	10,47	11,05	11,77	9,54	12,56
Producción Salvador	[kt Mo]	1,38	1,46	1,27	1,29	0,84	0,67	0,57	0,65	0,82	0,82	0,96	1,26	1,16	1,35
<b>Total Codelco</b>	[kt Mo]	<b>16,86</b>	<b>18,40</b>	<b>16,59</b>	<b>16,94</b>	<b>15,55</b>	<b>16,55</b>	<b>13,82</b>	<b>14,43</b>	<b>14,83</b>	<b>15,01</b>	<b>15,95</b>	<b>16,72</b>	<b>15,35</b>	<b>18,84</b>
Producción Los Bronces	[kt Mo]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	1,17	2,07	2,49
Producción Colihues	[kt Mo]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Producción Pelambres	[kt Mo]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	0,20
Producción Collahuasi	[kt Mo]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Total privados</b>	[kt Mo]	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,08</b>	<b>1,17</b>	<b>2,29</b>	<b>2,69</b>
<b>Total Chile RMD</b>	<b>[kt Mo]</b>	<b>16,86</b>	<b>18,40</b>	<b>16,59</b>	<b>16,94</b>	<b>15,55</b>	<b>16,55</b>	<b>13,82</b>	<b>14,43</b>	<b>14,83</b>	<b>15,01</b>	<b>16,03</b>	<b>17,89</b>	<b>17,64</b>	<b>21,53</b>

	Unidades	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Producción Andina	[kt Mo]	1,62	3,29	3,59	2,72	1,86	2,06	2,98	3,24	3,31	2,53	2,13	2,16	2,90	3,18
Producción El Teniente	[kt Mo]	3,39	4,24	5,19	4,72	3,90	3,51	3,92	5,25	4,75	5,05	4,58	5,18	5,62	6,01
Producción Codelco Norte	[kt Mo]	14,86	14,19	13,91	15,22	12,88	16,43	24,27	26,83	17,78	19,07	12,94	13,07	12,12	12,80
Producción Salvador	[kt Mo]	1,74	2,06	2,26	1,58	1,26	1,17	1,15	1,25	1,37	1,21	0,87	1,15	1,04	1,02
<b>Total Codelco</b>	[kt Mo]	<b>21,61</b>	<b>23,78</b>	<b>24,95</b>	<b>24,24</b>	<b>19,90</b>	<b>23,17</b>	<b>32,32</b>	<b>36,57</b>	<b>27,21</b>	<b>27,86</b>	<b>20,52</b>	<b>21,56</b>	<b>21,68</b>	<b>23,01</b>
Producción Los Bronces	[kt Mo]	3,69	3,48	3,19	2,32	1,72	1,51	1,71	2,12	2,55	2,58	2,58	2,77	1,93	0,95
Producción Colihues	[kt Mo]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,29	0,31	0,22	0,35	0,27	0,35	0,36
Producción Pelambres	[kt Mo]	0,00	0,00	5,51	6,93	7,85	8,69	7,85	8,71	9,85	10,16	7,76	7,79	8,76	9,88
Producción Collahuasi	[kt Mo]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,81	3,36	4,04	2,47	2,54	4,48	6,66
<b>Total privados</b>	[kt Mo]	<b>3,69</b>	<b>3,48</b>	<b>8,70</b>	<b>9,25</b>	<b>9,57</b>	<b>10,20</b>	<b>9,56</b>	<b>11,93</b>	<b>16,07</b>	<b>17,00</b>	<b>13,16</b>	<b>13,37</b>	<b>15,52</b>	<b>17,85</b>
<b>Total Chile RMD</b>	<b>[kt Mo]</b>	<b>25,30</b>	<b>27,26</b>	<b>33,65</b>	<b>33,49</b>	<b>29,47</b>	<b>33,37</b>	<b>41,88</b>	<b>48,50</b>	<b>43,28</b>	<b>44,86</b>	<b>33,68</b>	<b>34,93</b>	<b>37,20</b>	<b>40,86</b>

## D.2 Resultados modelo optimización

		1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
<b>Precio nominal</b>	[usd/Kg Mo]	8,00	7,42	6,46	6,50	7,66	7,49	6,29	4,89	4,85	5,11	10,12	17,73	8,32	9,50	7,55
<b>Costo a concentrado</b>	[usd/Kg Mo]	1,69	1,69	1,64	1,68	1,75	1,83	1,90	1,90	1,92	1,94	1,97	2,04	2,09	2,09	2,03
<b>Extracción</b>	[kt Mo]	16,86	18,40	16,59	16,94	15,55	16,55	13,82	14,43	14,83	15,01	16,03	17,89	17,64	21,53	25,30
<b>Envío a stock</b>	[kt Mo]	-	-	-	-	-	-	-	8,17	14,83	15,01	16,03	-	-	-	-
<b>Stock inicio año</b>	[kt Mo]	-	-	-	-	-	-	-	-	8,17	15,34	21,86	31,22	-	-	-
<b>Variación stock</b>	[kt Mo]	-	-	-	-	-	-	-	-	7,65	8,50	6,67	31,22	-	-	-
<b>Costo oportunidad</b>	[millones US\$]	-	-	-	-	-	-	-	6,02	11,24	16,58	39,32	-	-	-	-
<b>Beneficio</b>	[millones US\$]	<b>106,31</b>	<b>105,46</b>	<b>80,00</b>	<b>81,64</b>	<b>91,93</b>	<b>93,59</b>	<b>60,64</b>	-	-	-	-	<b>822,46</b>	<b>109,93</b>	<b>159,64</b>	<b>139,57</b>

		1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
<b>Precio nominal</b>	[usd/Kg Mo]	5,86	5,64	5,19	8,24	11,61	36,32	70,44	54,58	66,36	63,70	24,42	34,65	34,06
<b>Costo a concentrado</b>	[usd/Kg Mo]	2,04	2,09	2,09	2,03	2,05	2,17	2,19	2,14	2,26	2,40	2,57	2,69	2,76
<b>Extracción</b>	[kt Mo]	27,26	33,65	33,49	29,47	33,37	41,88	48,50	43,28	44,86	33,68	34,93	37,20	40,86
<b>Envío a stock</b>	[kt Mo]	-	12,18	28,58	29,47	33,37	41,88	-	37,56	-	-	28,36	-	-
<b>Stock inicio año</b>	[kt Mo]	-	-	12,18	28,58	45,30	65,00	65,00	-	37,56	-	-	28,36	-
<b>Variación stock</b>	[kt Mo]	-	-	12,18	12,75	13,67	41,88	65,00	-	37,55	-	-	28,36	-
<b>Costo oportunidad</b>	[millones US\$]	-	9,89	21,90	48,53	91,55	252,16	-	214,30	-	-	76,28	-	-
<b>Beneficio</b>	[millones US\$]	<b>103,81</b>	<b>41,30</b>	-	-	-	<b>1.168,47</b>	<b>7.839,14</b>	-	<b>5.326,30</b>	<b>2.043,37</b>	-	<b>2.147,90</b>	<b>1.270,08</b>