

# COCHILCO

COMISIÓN CHILENA DEL COBRE  
Dirección de Estudios

**COSTOS DE LA MINERÍA:  
¿CUÁNTO IMPACTAN LOS INSUMOS EN LA INDUSTRIA DEL COBRE?**

**DE/17/08**

Registro de Propiedad Intelectual

© N°176716

## INDICE

Resumen Ejecutivo	.....	3
Introducción	.....	4
Descripción de los datos	.....	9
El Modelo	.....	10
Metodología de Estimación	.....	13
Resultados	.....	14
Conclusiones	.....	19
Bibliografía	.....	21
Anexos	.....	23

## Resumen Ejecutivo

La caída abrupta del precio del cobre y, en general de la mayoría de las materias primas, ha llevado a que la discusión en torno a los costos sea un tema fundamental en la industria del cobre, ya que existe consenso que si una empresa desea ser líder y permanecer así en el mercado debe ser exitosa en el manejo y gestión de éstos. Sin embargo, el grado en que las firmas pueden afectar los costos se relaciona directamente con aquellas variables que efectivamente pueden controlar.

La motivación de este estudio es la construcción de una función de costos que recoja los aspectos principales de la industria minera nacional y que permita identificar la participación de los distintos factores productivos dentro de los costos totales. Esto es importante, porque en un ambiente de precios deprimidos, se entregarán algunas directrices a las compañías mineras que les indicarán, dónde - eventualmente -, se podrían poner los énfasis para reducir los costos. Este proceso de reorganización puede ganar en eficiencia si además se tiene información de las economías de escala de las firmas y del impacto que tiene la ley de extracción sobre los costos totales.

Se concluye que un 35% de los costos de producción lo explican la mano de obra (22.6% en mano de obra directa y 12.3% en mano de obra indirecta), un 20% la energía, un 30% otros insumos y un 15% se carga a los costos vía depreciación por el capital invertido en la faena.

Por su parte, la ley de extracción resulta significativa y con el signo esperado, lo que permite verificar y cuantificar la relación inversa entre la ley media y los costos.

También, se verifica la existencia de economías de escala, las que se presentan hasta un nivel de producción de 400 mil toneladas, aunque para las primeras 200 mil toneladas, los costos medios caen rápidamente. En el rango 400 mil - 900 mil toneladas, los costos medios continúan cayendo pero a una tasa bastante menor, mientras que para niveles superiores a 900 mil toneladas, se observan deseconomías de escala.

## 1. Introducción

Las condiciones favorables que gozó la industria del cobre en los últimos años se tradujeron en importantes ganancias para las empresas mineras. El rol que jugaron los fundamentos de mercado en este escenario fue clave, aunque fueron estas mismas variables las que presionaron para que los precios de algunos insumos aumentaran considerablemente. El petróleo, la mano de obra, la energía y el acero anotaron variaciones acumuladas superiores al 30% entre 2001 y 2007. Sin embargo, esta alza en insumos mineros clave fue más que compensada por el aumento de los precios. La Tabla N°1 muestra la razón precio/costos brutos<sup>1</sup>, o lo que es lo mismo, el margen de contribución de cada libra de cobre vendida. Se desprende que históricamente esta relación ha sido del orden de 1.3 a 1.4 veces, sin embargo, a partir de 2004 ésta se comenzó a ampliar casi triplicándose en 2006, lo que se mantuvo gran parte del año 2008. En efecto, cuando los precios son altos, los costos de producción tienden a subir en la medida que los productores centran sus esfuerzos en maximizar sus ingresos, se operan sectores de baja ley o se reabren sectores antiguos de la mina, lo que sumado al alza del precio de los insumos, eleva los costos de explotación y procesamiento. (Muñoz & Picozzi, 1998, 2002).

Actualmente, el escenario es distinto: la caída abrupta del precio del cobre y, en general de la mayoría de las materias primas, ha llevado a que el nivel de costos resulte muy relevante para determinar la capacidad de generar excedentes. El precio del cobre se ubica actualmente en torno al nivel de 1,5 dólar/libra y existe alta incertidumbre respecto a su tendencia futura, pero en general se estima que los precios no repuntarán sustancialmente en el mediano y corto plazo.

Una característica distintiva de la industria minera y, en particular de la industria del cobre, es que en los costos de operación influyen una serie de variables, muchas de las cuales escapan a la propia gestión de la compañía. Por ejemplo, la calidad de los depósitos expresada en la ley media de extracción y el tipo de mineralización, son dos elementos que tienen un impacto importante, tanto en los costos totales promedio como en los cash cost.

---

<sup>1</sup> Incluye Costos directos, indirectos, intereses y no se han realizado los descuentos por subproductos.

TABLA N°1: PRECIO DEL COBRE Y COSTOS BRUTOS  
Período 1992 - 2007, en ¢/lb nominales.

Año	Costo Bruto (CB)	Precio del Cobre (P)	Razón P/CB
1992	73.8	103.6	1.4
1993	77.1	86.7	1.1
1994	75.0	104.9	1.4
1995	74.4	133.2	1.8
1996	68.8	103.9	1.5
1997	70.2	103.2	1.5
1998	62.3	75.0	1.2
1999	56.6	71.4	1.3
2000	57.8	82.3	1.4
2001	54.6	71.6	1.3
2002	54.0	70.6	1.3
2003	56.3	80.7	1.4
2004	66.2	130.1	2.0
2005	88.9	167.1	1.9
2006	107.6	305.3	2.8
2007 (1)	110.3	323.2	2.9
2008 (2) (3)	127.5	347.8	2.7
2009 (2) (4)	129.8	160.0	1.2

Nota : (1) 2007, estimado. (2) 2008 y 2009 ajustado según variación del IPM USA de acuerdo a datos del Consensus Forecast del mes de noviembre de 2008. (3) El precio de 2008 es el promedio mensual a octubre de este año. (4) El precio de 2009 corresponde al pronóstico realizado por Cochilco en el Informe Tendencias del Mercado del Cobre para el Tercer Trimestre de 2008 (pág. 20).

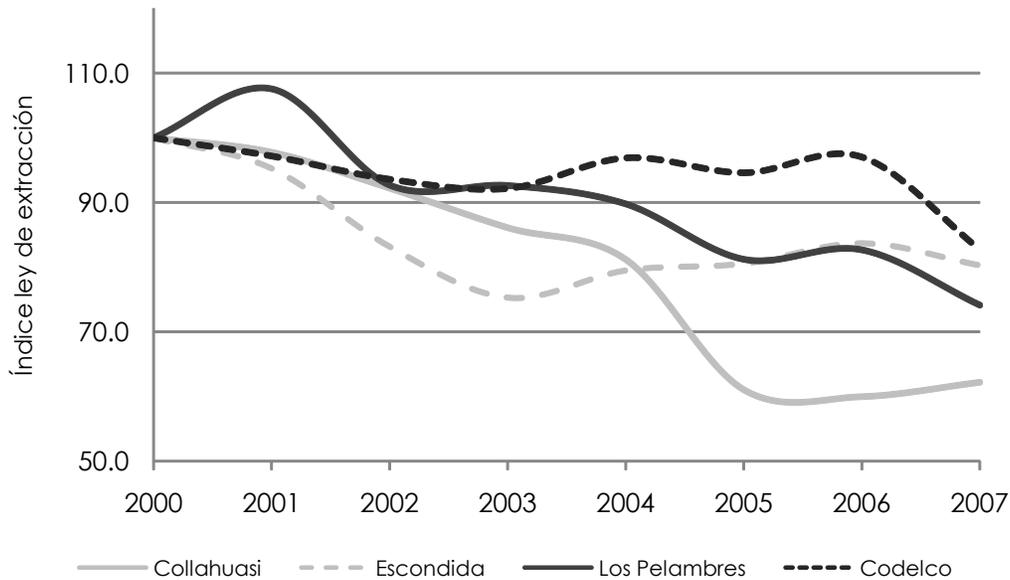
Fuente : Elaboración Cochilco en base a datos de Brook Hunt.

La Figura N°1 muestra un índice de la evolución de la ley de extracción para Collahuasi, Codelco, Los Pelambres y Escondida<sup>2</sup>. Si bien, se trata de niveles distintos, dos aspectos resultan interesantes: primero, se observa que la ley ha venido disminuyendo en el caso de las cuatro operaciones de manera sostenida en los últimos años; segundo, mientras Codelco ha mantenido una ley relativamente estable y en torno al 90% a la existente en el año 2000, Collahuasi y Los Pelambres han experimentado una caída abrupta de ésta. La ley media para Collahuasi en 2007 fue alrededor de un 40% menos que la existente en el año 2000, mientras que la de Los Pelambres lo fue un 26% menos. La evolución de la ley para Escondida ha sido

<sup>2</sup> La producción de estas cuatro compañías representa el 68.7% de la producción chilena de cobre fino comerciable por empresas.

bastante similar, una fuerte caída los primeros años<sup>3</sup> y luego, a partir del año 2004, una estabilización en torno al 80% de la existente en el año 2000 la que se ha mantenido hasta 2007.

FIGURA N°1: EVOLUCIÓN DE LA LEY DE EXTRACCIÓN  
Periodo 2000-2007. Índice, 2000=100.



Fuente: Elaboración Cochilco en base a datos Brook Hunt.

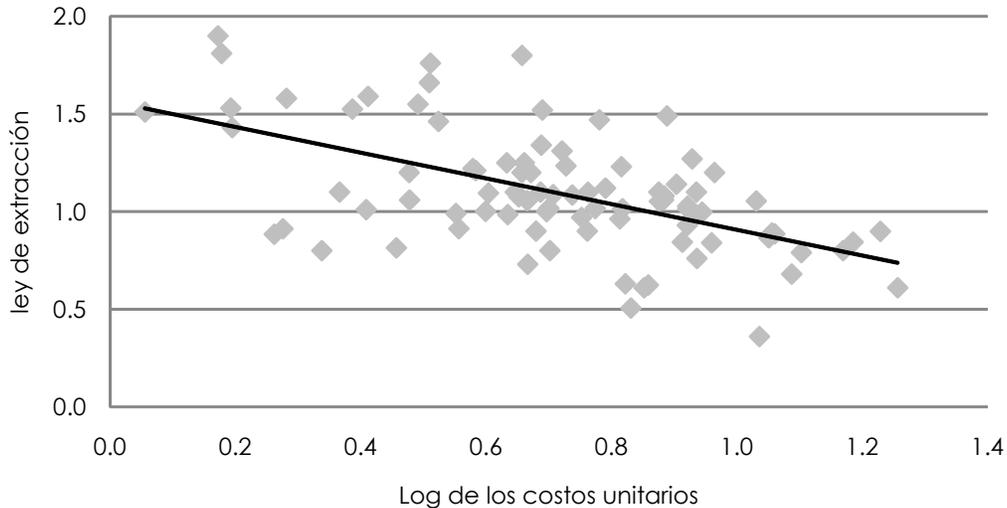
La Figura N°2 muestra que existe una relación negativa entre la ley media del yacimiento y los costos. Aunque la existencia de correlación no necesariamente indica causalidad, de la figura se desprende que mientras menor es la ley de extracción mayor son los costos unitarios. La intuición es que mientras menor es la ley, se tiene que mover más material para obtener la misma cantidad de cobre, luego, mayores son los costos. Sumado a lo anterior, se tiene que en una primera etapa, las compañías explotan los mejores sectores de la mina, pero a medida que pasa el tiempo y el yacimiento envejece es necesario explotar sectores más remotos y alejados de la superficie, con roca más dura y de menor calidad, lo que necesariamente se traduce en un mayor costo en equipos e insumos.

Existen varias formas y metodologías de analizar la oferta de una firma productora de cobre. Un camino es a través de la construcción de un modelo geológico multidimensional que analice las características mineralógicas del yacimiento y su estructura operacional. A partir de sondajes e inferencia es posible identificar distintos sectores de la mina y modelar el cuerpo del

<sup>3</sup> En 2003, la ley representó un 75% de la existente en el año 2000.

yacimiento, estudiar su volumen y su riqueza. Con esta información, se diseña el plan minero que optimizaría la explotación del recurso y maximizaría su valor presente. Otro camino, consiste en el desarrollo de modelos factoriales, éstos a partir del peso que tiene cada elemento en los costos permiten determinar cuánto se gastará en un determinado ítem.

FIGURA N°2: RELACIÓN COSTOS UNITARIOS - LEY DE EXTRACCIÓN  
Período 2000-2007.



Fuente: Elaboración Cochilco en base a datos Brook Hunt.

Por su parte, el desarrollo de estudios específicos orientados a analizar el índice de esfuerzo minero, permite medir la cantidad de trabajo requerido para explotar la mina según el tipo de roca y las características del yacimiento. Mientras que, la construcción de modelos logísticos, que incluyen aspectos relacionados con el transporte (roca, grava, concentrado, ácido sulfúrico, etc.) y con la cantidad de insumos requeridos en el análisis, permiten determinar y definir una provisión óptima de éstos durante el tiempo de operación de la mina.

Aunque estos modelos y metodologías proporcionan información relevante para la operación eficiente de un yacimiento, al estar basados en conceptos ingenieriles no permiten la comprensión de los fundamentos económicos que subyacen en el proceso productivo (Azzalini et al, 2007). En cambio, las funciones de producción y de costos facilitan la comprensión de las relaciones existentes entre los distintos insumos utilizados en el proceso de transformación y su impacto en la producción. Es así como, a partir del estudio de los costos, es posible analizar la evolución del rendimiento y de la productividad en las distintas faenas mineras, comparar la eficiencia productiva y analizar posibles economías (deseconomías) de escala. Lo anterior es

importante porque permite determinar la estructura de producción óptima. Si bien, existen varios estudios que analizan los costos de producción de la industria del cobre (Takeuchi et al, 1986; Picozzi & Muñoz, 1998 y 2002; Crowson, 2003), la mayoría de éstos se han centrado en discutir la evolución de los costos más que en explicar su comportamiento.

Un reciente estudio de Guzmán & Fujiono (2008), señala que el método de producción (subterráneo o rajo abierto), el nivel (capacidad), el estatus de producto (si el cobre es o no el producto principal), y la edad del yacimiento resultan significativos a la hora de explicar la evolución y comportamiento de los costos. Además, concluyen que las economías de escala<sup>4</sup> se agotan en torno a las 400 mil toneladas, luego de lo cual permanecen constantes.

La motivación del presente estudio es la construcción de una función de costos que recoja los aspectos principales de la industria minera nacional y que permita identificar la participación de los distintos factores productivos dentro de los costos totales. Esto es importante, porque en un ambiente de precios deprimidos, se entregarán algunas directrices a las compañías mineras que les indicarán, dónde - eventualmente -, se podrían poner los énfasis para reducir los costos. Este proceso de reorganización puede ganar en eficiencia si además se tiene información de las economías de escala de las firmas y del impacto que tiene la ley de extracción sobre los costos totales.

Para la modelación de la función de costos se utiliza la función translogarítmica propuesta por Christensen, Jorgenson y Lau (1973). Esta metodología tiene la ventaja de ser bastante flexible, ya que no impone restricciones respecto de las elasticidades de sustitución entre los insumos ni a los rendimientos de escala. La dificultad que presenta es que genera una pérdida de grados de libertad a medida que aumenta el número de regresores.

Este documento está organizado de la siguiente manera. Luego de esta introducción, en la segunda sección se describen los datos utilizados. En la tercera parte se especifica el modelo a estimar y se presenta el marco teórico pertinente. La cuarta sección describe la metodología de estimación. La quinta, está destinada al análisis de los resultados. Finalmente, se exponen las conclusiones de este trabajo.

---

<sup>4</sup> En términos de cash cost.

## 2. Descripción de los datos

La muestra considerada consiste en datos de panel para las 10-GMP y Codelco para el período 2000 – 2007. Considerar a estas 11 empresas supone incluir alrededor del 90% de la producción chilena de cobre (Tabla N°2).

TABLA N° 2: PARTICIPACIÓN DE LAS 10 GMP Y CODELCO  
(Período 2000 - 2007, en Tons métricas de fino, Tmf.)

Año	Total 10GMP + Codelco	Total Producción	Participación 10GMP + Codelco
2000	4,322,820	4,602,000	94%
2001	4,408,574	4,739,000	93%
2002	4,224,093	4,580,600	92%
2003	4,516,148	4,904,200	92%
2004	4,988,911	5,412,500	92%
2005	4,871,682	5,320,500	92%
2006	4,886,016	5,360,800	91%
2007	4,945,253	5,557,000	89%

Fuente : Elaboración Cochilco.

Como una forma de evitar el problema de producción cero y las complicaciones que una transformación Box-Cox podría tener para la interpretación de los resultados, la producción total se agrupa en sólo una categoría de producto, producción de mina y cuatro categorías de insumos, mano de obra (L), energía (E), capital (K) y otros insumos (I). Los datos de producción (Y) se obtienen a partir del "Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales", editado por COCHILCO en el año 2008. Para los datos de costo total, se utiliza la base de datos de "Costos y gastos GMP-10 y Codelco, según Estados de Resultados Individuales" construida por la Dirección de Evaluación y Gestión Estratégica (DEGE) de COCHILCO. Los datos de precio de los insumos fueron extraídos de distintas fuentes. El precio de la mano de obra se obtiene de la base de datos de la Superintendencia de AFP, donde a partir de la serie del Ingreso Imponible del sector minero se construye un índice de remuneraciones para el sector. Para el valor de la mano de obra externa, se hace el mismo procedimiento anterior pero se toma como referencia el ingreso imponible del sector construcción, lo anterior porque el gasto indirecto más relevante en el

sector minero está asociado, precisamente a esta partida<sup>5</sup>. Para el precio de la energía eléctrica, se considera el valor nudo de la energía nominal en dólares por hora (\$US/kWh) para el promedio ponderado de los meses de abril y octubre del Sistema Interconectado Central (SIC) y del Sistema Interconectado del Norte Grande (SING). Para el precio del capital, se toma como referencia (costo de oportunidad) el rendimiento de un bono del tesoro americano (Treasury Bill) a 10 años. Para el precio de los otros insumos, se considera el índice de precios al por mayor para el sector minero, disponible en la base de datos del Banco Central de Chile. La serie de datos para la ley media de extracción se obtiene de la base de datos Brook Hunt. Para las faenas con procesos Sx-Ew se utiliza la *Cu grade total* del Heap Leach, mientras que para el resto de las faenas se utiliza la *head grade* o ley media de planta.

Todas las series monetarias se trabajan en dólares, fueron deflactadas por el IPM *all commodities* de Estados Unidos y se construyeron índices de precio con base 2007=100. Todas las variables se trabajan en logaritmos.

### **3. El Modelo**

La minería del cobre chilena es modelada a través de una función de costos<sup>6</sup>, siguiendo la metodología propuesta por Christensen, Jorgenson y Lau (1973). Se utiliza este enfoque en vez de una función de producción, porque en general, las empresas de la minería del cobre no determinan el nivel de producción que les permite maximizar las utilidades, sino que producen lo máximo en función de su capacidad instalada. Así, las decisiones al interior de las firmas no pasan por definir cuánto producir, sino por definir cuál es el nivel óptimo de insumos a utilizar. Además, dado que la industria del cobre compite con otras industrias por factores de producción escasos, es muy probable que los precios de los insumos que enfrenta sean exógenos, en vez de las cantidades. De esta forma, la función de costos incluye dentro de sus argumentos tanto al nivel de producción como el precio de los insumos.

---

<sup>5</sup> Ver Cantallopis, Molina y Pérez, "Análisis histórico y estimaciones futuras del aporte de la minería al desarrollo de la economía chilena, COCHILCO. Documento de Trabajo 28/3, marzo de 2008.

<sup>6</sup> Ver Anexo Metodológico.

La función de costos translog para el caso de una firma monoprodutora que utiliza 4 insumos, (mano de obra, L; energía, E; capital, K y; otros insumos, I), viene dada por la siguiente expresión<sup>7</sup>:

$$\ln C = \alpha_0 + \alpha_Y \ln Y + \frac{1}{2} \beta_{YY} (\ln Y)^2 + \sum_{i=1}^4 \alpha_i \ln W_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \beta_{ij} \ln W_i \ln W_j + \sum_{i=1}^4 \beta_{Yi} \ln Y \ln W_i \quad (1)$$

donde  $\beta_{ij} = \beta_{ji}$ , C es el costos total, Y es la producción de mina, i, j = L, E, K e I, y  $\alpha_0, \alpha_i, \alpha_Y, \beta_{YY}, \beta_{Yi}, \beta_{ij}$  son los parámetros a estimar.

Como es clásico en el análisis de funciones de costo, es necesario establecer las siguientes condiciones:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \quad \sum_{i=1}^n \beta_{Yi} = 0 \quad \sum_{i=1}^n \beta_{ij} = \sum_{i=1}^n \beta_{ji} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \beta_{ji} = 0 \quad (2)$$

Con estas restricciones, la función de costos translog es homogénea de grado uno en precios; esto es, para un nivel fijo de producción, cuando los precios de todos los factores se incrementan, los costos totales aumentan proporcionalmente.

Una característica de la función de costos es que las funciones de demanda derivada de factores se pueden computar fácilmente diferenciando parcialmente la función de costos respecto del precio de cada factor:

$$\frac{\partial C}{\partial W_i} = X_i \quad (3)$$

Este resultado, conocido como el Lema de Shephard, es convenientemente expresado en forma logarítmica a través de:

$$\frac{\partial \ln C}{\partial \ln W_i} = \frac{W_i X_i}{C} = S_i \quad (4)$$

Luego,  $S_i$  indica la proporción del costo total que se gasta en el i-ésimo factor, o lo que es lo mismo, la participación del factor de producción i-ésimo en los costos totales de producción.

---

<sup>7</sup> Propuesta por Christensen, Jorgenson y Lau (1973).

Finalmente, conocer si existen economías (deseconomías) de escala y sobre qué rango de producción, es importante para el proceso de toma de decisiones. En particular, el análisis y la correcta identificación de economías de escala es un determinante clave en las políticas de inversión sobre todo en industrias en crecimiento. Por ejemplo, si existen economías de escala y además demanda creciente, las firmas encontrarán que resulta atractivo y rentable aumentar la capacidad instalada más allá de lo que estiman utilizar en el futuro.

Usualmente el concepto de economías o retornos de escala se define como el incremento relativo de la producción resultante de un incremento proporcional en todos los factores. En otras palabras, muestra la respuesta de la producción del bien ante cambios proporcionales en el empleo de todos los insumos en un factor común  $k$ . Una forma natural de representar las economías de escala es como el incremento proporcional en los costos resultante de un pequeño incremento proporcional en la producción. Siguiendo a Christensen & Greene (1976), las economías de escala (SCE), se definen como la unidad menos esta elasticidad:

$$SCE = 1 - \frac{\partial \ln C}{\partial \ln Y} = 1 - \varepsilon_{C,Y} \quad (5)$$

Si SCE es mayor que cero, existen economías de escala; si es menor, deseconomías. Es decir, el incremento de los costos es proporcionalmente menor (mayor) que el incremento del producto. Mientras que si  $SCE = 0$ , existen retornos constantes de escala, ya que el incremento de los costos es igual al incremento en el producto.

A diferencia de otras especificaciones, como la forma funcional Cobb-Douglas o de elasticidad de sustitución constante (CES), la función translogarítmica (translog) tiene la ventaja de ser bastante flexible, ya que no restringe que la estructura de producción sea homotética, tampoco impone restricciones sobre las elasticidades de sustitución. Sin embargo, estas restricciones pueden ser testeadas estadísticamente. De esta forma, si alguna de las restricciones es válida, es preferible adoptar la forma simplificada. Si no, resulta de interés económico, evaluar el impacto que tienen estas restricciones sobre la forma de las curvas de costos.

Una función de costos es homotética si la participación de los insumos en los costos no varía con el nivel de producción. Esto equivale a decir que la función de costos puede ser escrita como una función separable en producto y precio de los insumos. Una estructura de producción

homotética, es además homogénea si y sólo si la elasticidad costo con respecto a la producción es constante.

Para una función de costos translog, la restricción de homoteticidad se describe como:

$$\beta_{Yi} = 0 \quad (6)$$

Mientras que la de homogeneidad, como:

$$\beta_{Yi} = 0 \quad , \quad \beta_{YY} = 0 \quad (7)$$

Asimismo, las elasticidades de sustitución pueden restringirse a ser unitarias eliminando el término de segundo orden en los precios desde la función de costos translog. Así, la restricción de elasticidad unitaria implica:

$$\beta_{ij} = 0 \quad (8)$$

#### 4. Metodología de Estimación

Usando el Lema de Shephard, se derivan las ecuaciones de participación del factor de producción i-ésimo en los costos totales. Para ello, basta con diferenciar la ecuación (1) respecto al precio de cada uno de los insumos:

$$\frac{\partial \ln C}{\partial \ln W_i} = \frac{W_i X_i}{C} = S_i = \emptyset_i + \sum_{j=1}^n \emptyset_{ij} \ln W_j + \emptyset_{Yi} \ln Y \quad (9)$$

Además, si se asume que cada firma es eficiente, es decir que está produciendo al mínimo costo, los parámetros que arroja la estimación de las ecuaciones de participación deben cumplir con las siguientes restricciones<sup>8</sup>:

$$\alpha_i = \emptyset_i \quad \beta_{ij} = \emptyset_{ij} \quad \beta_{Yi} = \emptyset_{Yi} \quad (10)$$

Es posible estimar los parámetros de la función de costos usando mínimos cuadrados ordinarios (OLS), la ventaja de esta metodología es la simplicidad. Sin embargo, se ignora toda la

<sup>8</sup> Ver Varian, "Análisis Microeconómico", pág. 247.

información contenida en las ecuaciones de participación (9), las cuales son también estimables. Además, aún para un reducido número de factores productivos, la función de costos translog tiene una gran cantidad de regresores los que, aparte de los niveles de producción, no varían mucho entre las firmas. Por lo tanto, es muy probable que existan problemas de multicolinealidad y con ello parámetros poco precisos. Un procedimiento alternativo, supone estimar ecuación por ecuación a través de OLS. No obstante, este procedimiento es ineficiente si las ecuaciones de participación dependen de las mismas condiciones de la industria (Christensen et al, 1973, Christensen & Greene, 1976). Entonces, para tomar en cuenta estas consideraciones y ganar eficiencia en la estimación, se utiliza la metodología propuesta por Zellner (1962) de ecuaciones aparentemente no relacionadas (*seemingly unrelated regressions* o *método SUR*). Así, cuando las ecuaciones de participación (9) se estiman simultáneamente con la función de costos (1), se incrementan los grados de libertad, se obtiene un modelo explicativo mejor y se gana en eficiencia. Por construcción, las ecuaciones de participación suman uno, de modo que para evitar problemas de singularidad en la matriz de covarianzas, una de las ecuaciones de participación debe ser borrada cuando se corre el modelo (Christensen & Greene, 1976). Tal como lo discute Barten (1969), en el contexto de la estimación por máxima verosimilitud, es irrelevante cuál ecuación se elimina, ya que los coeficientes estimados resultantes son siempre los mismos. Para la estimación de los coeficientes, se utiliza el método SUR iterativo (ISUR), ya que tal como sugieren Kmenta & Gilbert (1968), este procedimiento entrega parámetros que convergen a los de máxima verosimilitud<sup>9</sup>.

## 5. Resultados

Se estiman 5 modelos adicionales al modelo original (Modelo 1). El modelo 2 impone la restricción de homoteticidad (6) y el Modelo 3 la de homogeneidad (7). Los modelos 4, 5 y 6 corresponden a los Modelos 1, 2 y 3, respectivamente, pero con elasticidad de sustitución unitaria (8). Se controla por la ley de extracción (GR) para aislar este efecto sobre los costos.

Se comienza estimando el modelo descrito en la ecuación (1) que corresponde a la ecuación translog sin restricciones. En el Anexo N°1 se entrega el set de parámetros para los 6 modelos. Los estadísticos-t, que están entre paréntesis, señalan que los coeficientes de sustitución ( $\beta_{ij}$ ) del modelo 1 no resultan ni económica ni estadísticamente significativos. Esto sugiere que la

---

<sup>9</sup> La iteración del método SUR, es una metodología computacional en que se itera sobre la matriz de covarianza de los errores y sobre los parámetros estimados hasta que éstos convergen a los resultados máximo verosímil.

hipótesis de elasticidad de sustitución unitaria pareciera ser consistente con los datos. Por su parte, los coeficientes de no homoteticidad ( $\beta_{vj}$ ) resultan significativos, no obstante, el modelo 1 y el modelo 4 entregan un coeficiente de participación del capital negativo, lo que es inconsistente. Por lo tanto, los modelos que podrían explicar adecuadamente la estructura de costos de producción de la industria chilena del cobre, en virtud de la muestra de datos seleccionada, serían los modelos 5 y 6, restringidos a ser homotéticos y con elasticidad de sustitución unitaria. Estos resultados se confirman al aplicar un test de Wald. Sin embargo, sólo para fines de análisis comparativo se utiliza el modelo 4 (no homotético) para evaluar el impacto que tiene la participación de los insumos en los costos de producción y sobre las economías de escala.

En este punto, es fundamental precisar que las dificultades en la estimación, parecieran ser el resultado de un número insuficiente de datos. Se espera, entonces, que en un modelo ampliado incluyendo todas las operaciones a nivel mundial, se puedan obtener mejores estimaciones que permitan utilizar una ecuación translog sin restricciones.

Con todo, del análisis anterior, se desprende que la participación de los distintos insumos sobre los costos totales de la minería nacional se descompone en alrededor de un 35% para mano de obra, 20% en gastos asociados al consumo de energía, 30% se destina a gastos en otros insumos necesarios para el proceso productivo. El 15% restante, se explica por los costos de producción vía depreciación por el capital invertido en la faena (gastos de capital vía depreciación). También, se deduce que el impacto de la ley de extracción resulta negativo y significativo, de acuerdo a lo esperado. El coeficiente de -0.30 sugiere que por cada diez puntos porcentuales que aumente la ley de extracción, en promedio los costos de producción disminuirán un 3%. Es decir, una mayor ley de extracción efectivamente contribuye a disminuir los costos de producción.

El actual escenario nos indica que la baja del petróleo y la fuerte caída en los precios de la generación eléctrica, deberían contribuir a un relajamiento de los costos por este ítem<sup>10</sup>, algo similar debería suceder con los otros insumos (acero, repuestos, neumáticos, ácido sulfúrico, lubricantes y productos químicos en general). El impacto de la mano de obra sobre los costos totales es de un 35%, pero cuando se descompone en mano de obra directa e indirecta, se observa que cerca del 65% de este impacto lo representa la mano de obra directa (22.6%). El restante 35% (12.3%) lo representa la mano de obra indirecta o los servicios (Ver Tabla N°3). Se

---

<sup>10</sup> Aunque podría demorarse en algunos contratos que no son de corto plazo, como los de abastecimiento energético.

desprende que el factor mano de obra, por su importancia, es clave en la estructura de costos de las empresas mineras, por lo que reducir sus montos es crítico para materializar la urgente baja en los costos que el sector requiere. En este contexto, podría ser de mucha utilidad acciones como la renegociación de los contratos de suministro de mano de obra indirecta y la implementación de sistemas de incentivos (premios por eficiencia) para los trabajadores propios. En lo que se refiere al capital, éste no debería enfrentar grandes fluctuaciones, ya que los montos que actualmente impactan en los costos son las inversiones realizadas en el pasado. No hay que olvidar que en general en minería los montos de inversión son cuantiosos y sus efectos se distribuyen en el largo plazo, siendo relativamente insensible a la coyuntura y a las fluctuaciones de precio y costos de corto plazo.

TABLA N°3: MODELO INCLUYENDO MANO DE OBRA INDIRECTA

Parámetro	Modelo 5 incl. MOI	Modelo 6 incl. MOI
Mano de Obra directa	0.2265832 (32.99)	0.2265836 (32.99)
Mano de Obra Indirecta	0.1223786 (13.87)	0.1223931 (13.87)
Energía	0.2015781 (30.80)	0.2015875 (30.80)
Otros Insumos	0.3006337 (61.57)	0.3006317 (61.57)
Capital	0.1488264 (13.36)	0.1488042 (13.35)
$R^2$	0.9369	0.9348

Fuente : Elaboración Cochilco.

En cuanto a las economías de escala, una estimación de su comportamiento se puede obtener evaluando los coeficientes del modelo utilizando el valor medio de la producción y de los precios en el período de referencia. Se ha particionado la muestra en 5 grupos, de acuerdo a sus niveles de producción. En la Tabla N°4 se entregan los resultados para el valor medio de

cada grupo<sup>11</sup>. Las economías de escala estimadas para el modelo homogéneo (6), es constante para todos los niveles de producción. Los Modelos 4 y 5 permiten que éstas varíen de acuerdo a la producción.

TABLA N°4: ECONOMÍAS DE ESCALA ESTIMADAS  
Promedio del período 2000-2007.

Producción (miles de tons)	Modelo		
	4	5	6
117.1	0.23503	0.22576	0.03452
173.2	0.17343	0.16080	0.03452
244.0	0.11937	0.10383	0.03452
387.8	0.04597	0.02681	0.03452
1,348.8	-0.15004	-0.18035	0.03452

Fuente : Elaboración Cochilco.

El Modelo Homogéneo (6) indica erróneamente que independiente del nivel de producción, de todas maneras se obtienen economías de escala. Sin embargo, los modelos 4 y 5, no homotético y homotético con elasticidad unitaria, respectivamente, indican que las economías de escala disminuyen a medida que aumenta la producción y que se agotan en torno a las 400 mil toneladas, en línea con lo reportado por Guzmán & Fujiono (2008). Sin embargo, estos autores señalan que éstas se mantienen constantes para niveles de producción superiores, lo que para este estudio es efectivo pero hasta un nivel de producción cercano a las 900 mil toneladas, más allá de este nivel de producción se observan deseconomías de escala.

En la Tabla N°5 se entregan, para el valor medio de la producción del período 2000 – 2007, las economías de escala por faena. Se observa que el 57% de la producción nacional es aportado por 12 firmas, las que producen niveles inferiores a 440 mil toneladas. Éstas aún tienen un amplio espacio para aumentar la producción y aprovechar las economías de escala que aún no han sido explotadas, sujeto a que el volumen de recursos y reservas del yacimiento lo permita. El restante 43% de la producción es aportado sólo por dos unidades productivas: Escondida y Codelco Norte, las que producen niveles en torno al 1 millón de toneladas y se encuentran en el tramo de deseconomías de escala, es decir, en promedio comparado con la industria, sus costos totales aumentan más que proporcionalmente a medida que aumenta la producción.

<sup>11</sup> Para la construcción de los grupos, se ordenan las 11 mineras en función de sus niveles de producción, luego se separan en cinco grupos y se calcula el valor medio de la producción de cada uno.

TABLA N°5: ECONOMÍAS DE ESCALA ESTIMADAS POR FAENA  
Promedio del período 2000-2007.

Compañía	Producción (miles de tons)	Modelo		
		4	5	6
Collahuasi	439.6	0.04228	0.02387	0.03452
Escondida	1,083.7	-0.09924	-0.12528	0.03452
Anglo Sur	278.0	0.11080	0.09609	0.03452
El Abra	209.9	0.12183	0.10771	0.03452
Candelaria	193.7	0.14999	0.13739	0.03452
Zaldívar	143.5	0.20258	0.19281	0.03452
Anglo Norte	152.6	0.24975	0.24253	0.03452
Cerro Colorado	117.1	0.15263	0.14017	0.03452
Quebrada Blanca	77.5	0.22510	0.21655	0.03452
Los Pelambres	335.9	0.08214	0.06588	0.03452
Codelco Norte	913.7	-0.01504	-0.03654	0.03452
Salvador	76.4	0.28225	0.27678	0.03452
Andina	238.6	0.16840	0.15679	0.03452
El Teniente	385.1	0.05647	0.03882	0.03452

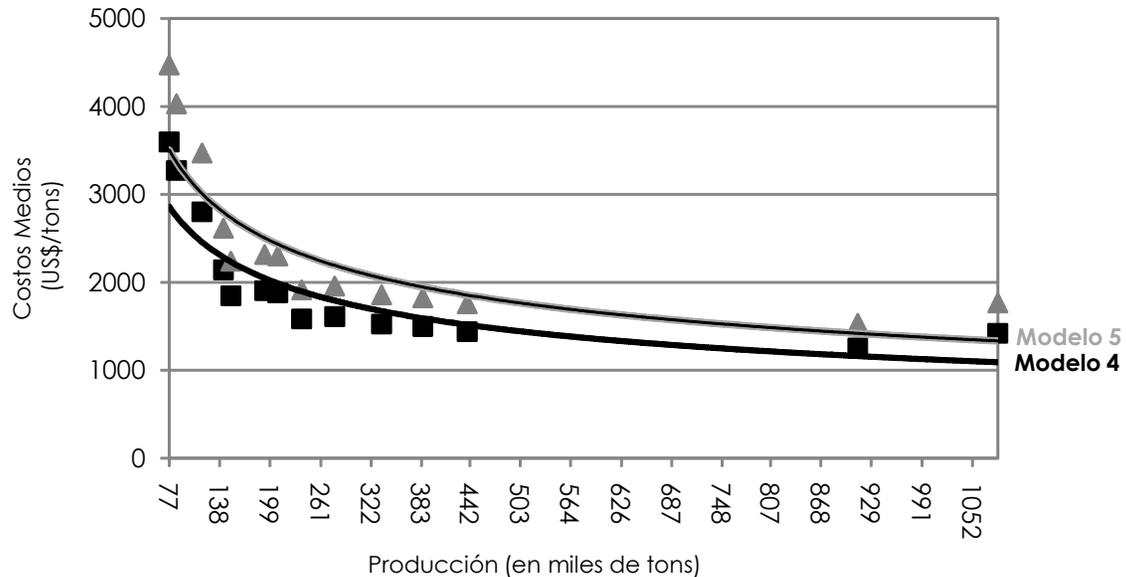
Fuente : Elaboración Cochilco.

Nota : Para el cálculo de las economías de escala, la producción se ha ajustado por ley de extracción.

Los resultados anteriores se confirman al observar la Figura N°3, que muestra el comportamiento de los costos medios de producción para la industria nacional. Si bien, el tramo de economías de escala se ubica hasta alrededor de las 400 mil toneladas, para las primeras 200 mil, que es donde se concentran 7 de las 14 faenas de la gran minería chilena del cobre, los costos medios caen rápidamente, luego de lo cual continúan cayendo pero a una tasa bastante más moderada. Por último, para niveles superiores a 900 mil toneladas, se observa que los costos medios tienden a aumentar.

Este comportamiento se explica porque las economías de escala están asociadas a tamaños de equipo y diseño de operación, de modo que es la misma tecnología la que se encuentra disponible tanto para firmas que producen hasta 400 mil toneladas como para aquellas que producen niveles superiores a 1 millón de toneladas.

FIGURA N°3: CURVA DE COSTOS MEDIOS  
Promedio del período 2000-2007.



Fuente : Elaboración Cochilco.

## 6. Conclusiones

Los costos son un tema central en la industria del cobre, y así lo han demostrado las distintas empresas en su accionar en los últimos años. Además, existe consenso que si una empresa desea ser líder y permanecer así en el mercado debe ser exitosa en el manejo y gestión de los costos, sobre todo ahora, en que el período de precios altos que gozó la industria en los últimos años parece ser parte del pasado.

Ahora bien, el grado en que las firmas pueden afectar los costos se relaciona directamente con aquellas variables que efectivamente pueden controlar. En este aspecto, en el presente estudio se concluye que un 35% de los costos de producción lo explican la mano de obra (22.6% en mano de obra directa y 12.3% en mano de obra indirecta), un 20% la energía, un 30% otros insumos y un 15% se carga a los costos vía depreciación por el capital invertido en la faena. La baja de los precios observados en el mercado de commodities, en particular en el petróleo y en la mayoría de los insumos, debería impactar de manera positiva sobre los costos, contribuyendo a relajar gran parte de estas partidas.

Por su parte, la ley de extracción resulta significativa y con el signo esperado, lo que permite verificar y cuantificar la relación inversa entre la ley media y los costos. Aunque es claro que éste es un factor exógeno, el camino para enfrentar esta restricción estructural de la actividad, pasa por el desarrollo de tecnologías más eficientes, un incremento en la exploración y una mayor capacidad de innovación, lo que exige un mayor compromiso de las firmas para destinar recursos a estas acciones.

También, se verifica la existencia de economías de escala, las que se presentan hasta un nivel de producción de 400 mil toneladas, aunque para las primeras 200 mil toneladas, los costos medios caen rápidamente. En el rango 400 mil - 900 mil toneladas, los costos medios continúan cayendo pero a una tasa bastante menor, mientras que para niveles superiores a 900 mil toneladas, se observan deseconomías de escala.

Entonces, si lo que se desea es continuar por la misma senda de desarrollo y crecimiento que ha mantenido la industria cuprífera nacional en los últimos años, aportando al desarrollo y bienestar de los chilenos, es tarea y desafío urgente fortalecer los esfuerzos por reducir los costos. En este trabajo se entregan algunas directrices hacia donde apuntar los énfasis. Pero, es claro que la consolidación de una industria minera nacional competitiva en costos, requiere además de un conjunto diferente de iniciativas: un mercado laboral justo pero flexible, con mano de obra capacitada, buenos programas de entrenamiento, desarrollo de empresas relacionadas, alianza con universidades, institutos y centros de formación técnica (CFT's), entre otras medidas. Por supuesto, también resultan muy relevantes las políticas públicas orientadas a fomentar la innovación y la investigación y desarrollo (I & D) que contribuyan a disminuir los costos.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

Azzali, P. H. Bloch & P. Haslehurst, "Australian coal mining: Estimating technical change and resource exhaustion in a translog cost function", Curtin university of Technology, Working Paper Series 04/07, 2007.

Barten, A. "Maximum likelihood estimation of a complete system of demand equations", *European Economic Review*, N°1, otoño de 1969, pág. 7 – 73.

Brook Hunt, "Copper Costs, mines and projects", Vol. 1 de 8, *Summary & Analysis*, marzo de 2007.

Brown, R., D. Caves & L. Christensen, "Modelling the structure of cost and production for multiproduct firms", *Southern Economic Journal*, Vol. 46, N°1, Julio de 1979, págs. 256 – 273.

Cantallopts, J., R. Molina & P. Pérez O., "Análisis histórico y estimaciones futuras del aporte de la minería al desarrollo de la economía chilena", COCHILCO. Documento de Trabajo 28/3, marzo de 2008.

Caves, D., L. Christensen. & J. Swanson, "Productivity Growth, scale economies and capacity utilization in U.S. railroads, 1955-74", *The American Economic Review*, Vol. 71, N°5, diciembre de 1981, págs. 994-1002.

Christensen, L. D. Jorgenson & L. Lau, "Transcendental logarithmic production frontiers", *The Review of Economics and Statistics*, Vol. 55, N°1, febrero de 1973, págs. 28-43.

Christensen, L. & W. Greene, "Economies of scale in U.S. electric power generation", *The Journal of Political Economy*, Vol. 84, N°4, Part 1, agosto de 1976, págs. 655-676.

Cobb, C. & P. H. Douglas, "A Theory of Production", *The American Economy Review*, Vol. 18, N°1 Supplement, Papers and Proceedings of the Fortieth Annual Meeting of the American Economic Association, marzo de 1928, págs. 139-165.

Crowson, P., "Mine size and the structure of costs", *Resources Policy*, Vol. 29, N°1, marzo de 2003, págs. 15- 36.

\_\_\_\_\_, "The copper industry 1945 – 1975", *Resources Policy*, Vol. 32, N°1, marzo de 2007.

CRU, *Copper Studies*, varios números.

Diewert. W. E. "An application of Shephard duality theorem: A generalized Leontief production function", *The Journal of Political Economy*, Vol. 79, N°3, mayo-junio de 1971, págs. 481 – 507.

García, P., P. Knights & J. Tilton, "Labor productivity and comparative advantage in mining: The copper industry in Chile", *Resources Policy*, Vol. 27, N°2, junio de 2001, págs. 97 – 105.

Guzmán, J.I., H. Fujiono, "What determines cash costs in the copper industry?", Working Paper, PUC, 2008.

Kmenta, J. & R. F. Gilbert, "Small sample properties of alternative estimators of seemingly unrelated regressions", *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 63, N°324, diciembre de 1968, págs. 1180 – 1200.

Mc Fadden, D. L., "Duality of production, cost, and profit functions", *parte I en Production Economics: A Dual approach to theory and applications* (en M. Fuss & D. McFadden), NorthHolland, Amsterdam, 1978.

Picozzi, A. & C. Muñoz, "Costos de Operación de la industria del cobre", *Documento Interno*, COCHILCO, noviembre de 1998.

\_\_\_\_\_, "Costos de Producción en la Industria del Cobre: Evolución 1980 – 2000", *Informe Técnico*, COCHILCO, marzo de 2002.

Takeuchi, K., J. Strongman & S. Maeda, "The world copper industry: its changing structure and future prospects", *Commodity Working Paper*, N°15, The World Bank, 1986.

Tilton, J., "Labor productivity, costs and mine survival during recession", *Resources Policy*, Vol. 27, N°2, junio de 2001, págs. 107 – 115.

Varian, H. "Análisis Microeconómico", Antoni Bosch Editor, 3ra Edición, 1992.

Zellner, A. "An efficient method of estimating seemingly unrelated regressions and test for aggregation bias", *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 57, N°298, junio de 1962, págs. 348 – 368.

## ANEXO N°1

Parámetro	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6
$\alpha_L$	0.7019386 (5.05)	0.3492313 (33.01)	0.3497665 (33.05)	0.6923836 (4.99)	0.3491551 (33.00)	0.3492187 (33.01)
$\alpha_E$	0.4412427 (4.98)	0.2016241 (30.81)	0.2018748 (30.84)	0.4398277 (4.97)	0.201585 (30.80)	0.201600 (30.80)
$\alpha_I$	0.4594614 (6.68)	0.3062296 (17.32)	0.3033062 (21.70)	0.4496235 (6.68)	0.3007318 (61.58)	0.3007483 (61.59)
$\alpha_K$	-0.6026427 (-4.80)	0.142915 (7.07)	0.1450525 (8.45)	-0.5818349 (-4.66)	0.148528 (13.33)	0.148433 (13.32)
$\beta_{L,E}$	6.470E-16 (0.14)	1.71E-15 (0.56)	3.79E-15 (0.77)	...	...	...
$\beta_{L,I}$	1.430E-15 (0.29)	-6.22E-16 (-0.17)	-8.74E-15 (-0.76)	...	...	...
$\beta_{L,K}$	-3.090E-15 (-0.52)	-3.98E-16 (-0.30)	-1.03E-15 (-0.12)	...	...	...
$\beta_{E,I}$	8.640E-16 (0.13)	-2.83E-16 (-0.18)	4.3E-15 (0.86)	...	...	...
$\beta_{E,K}$	4.260E-16 (0.12)	6.74E-17 (0.03)	-2.72E-15 (-0.95)	...	...	...
$\beta_{I,K}$	-0.0760154 (-1.93)	-0.058853 (-1.30)	0.0024805 (0.18)	...	...	...
$\beta_{L,L}$	1.890E-15 (0.14)	-7.14E-16 (-0.18)	-3.41E-15 (-0.31)	...	...	...
$\beta_{E,E}$	4.600E-15 (0.74)	-1.8E-15 (-0.29)	1.7E-14 (0.68)	...	...	...
$\beta_{I,I}$	-0.0032897 (-0.24)	-0.0016087 (-0.10)	-0.0024805 (-0.18)	...	...	...
$\beta_{K,K}$	0.0793052 (1.76)	0.0604617 (1.17)	4.795188 (2.33)	...	...	...
$\alpha_Y$	-1.350023 (-1.86)	-1.289919 (-1.86)	0.9731011 (39.03)	-1.045475 (-1.43)	-1.165457 (-1.68)	0.9654765 (37.71)
$\alpha_{Y,Y}$	0.1815353 (3.21)	0.1762682 (3.26)	...	0.1576925 (2.76)	0.1661962 (3.06)	...
$\beta_{Y,L}$	-0.0281747 (-2.54)	...	...	-0.0274144 (-2.47)	...	...
$\beta_{Y,E}$	-0.0191459 (-2.71)	...	...	-0.0190348 (-2.70)	...	...
$\beta_{Y,I}$	-0.012016 (-2.24)	...	...	-0.0118937 (-2.22)	...	...
$\beta_{Y,K}$	0.0593366 (5.97)	...	...	0.058343 (5.85)	...	...
$\alpha_G$	-0.310898 (-3.73)	-0.335259 (-4.21)	-0.3342071 (-4.28)	-0.3066491 (-3.67)	-0.3312761 (-4.18)	-0.2936206 (-3.73)
$\alpha_0$	15.08328 (3.26)	14.72402 (3.33)	0.2443693 (0.78)	13.15251 (2.82)	13.96207 (3.15)	0.3723671 (1.16)
R <sup>2</sup> Ajustado	0.918	0.926	0.930	0.922	0.929	0.929
Parámetros	11	8	7	9	6	5
Restricciones		(6)	(7)	(8)	(6) y (8)	(7) y (8)

## ANEXO METODOLÓGICO

La función de costos mide el costo mínimo de producir un determinado nivel de producto, dados los precios de los factores. Como tal, transmite información relevante respecto de la naturaleza de la tecnología de la firma. A juicio de Varian (1992), es el instrumento más útil para estudiar la conducta económica de una empresa. De la misma forma en que la función de producción describe las posibilidades técnicas de producción de la empresa, la función de costos describe las posibilidades económicas de ésta.

La transformación eficiente<sup>12</sup> de un vector de  $n$  insumos  $X$ , si la firma produce un único bien  $Y$ , se puede representar a través de la siguiente función implícita general:

$$f(Y; X_1, X_2, \dots, X_n; \theta) = 0 \quad (\text{i})$$

donde  $\theta$  representa otras variables que pueden afectar la función de transformación.

El principio de dualidad de Shephard, permite afirmar que si  $f$  satisface ciertas condiciones de regularidad, existe una única función de costos que es dual a  $f$ :

$$C = g(Y; X_1, X_2, \dots, X_n; \theta) \quad (\text{ii})$$

Si  $W_i$  representa el precio al cual los insumos  $X_i$  se pueden comprar, entonces  $C$  se define como el costo total:

$$C = \sum_{i=1}^n W_i X_i \quad (\text{iii})$$

Estas condiciones de regularidad suponen que (i) es estrictamente convexa con respecto a  $X$ . Lo anterior equivale a decir que (ii) es una función positiva real valorada, no decreciente, no negativa, linealmente homogénea y cóncava en cada  $W$  (Diewert, 1971). La dualidad entre (i) y (ii) establece que la tecnología puede ser equivalentemente representada por una función de producción o por una función de costos (Mc Fadden, 1978). Si esto es así, entonces tanto (i) como (ii) contienen la misma información respecto a las posibilidades de producción. En otras

---

<sup>12</sup> Un plan de producción  $y$  en  $Y$  es tecnológicamente eficiente si no existe otro plan  $y'$  en  $Y$  tal que  $y' \geq y$ . Ver Varian, pág 6.

palabras, es posible usar una función de costos para identificar las principales características económicas de la función de producción subyacente.

Documento elaborado en la Dirección de Estudios por:

Patricio Pérez Oportus  
Economista  
Comisión Chilena del Cobre

Publicado el 19 de diciembre de 2008

