



# Productividad en la Industria Minera en Chile

---

DE 31/2014

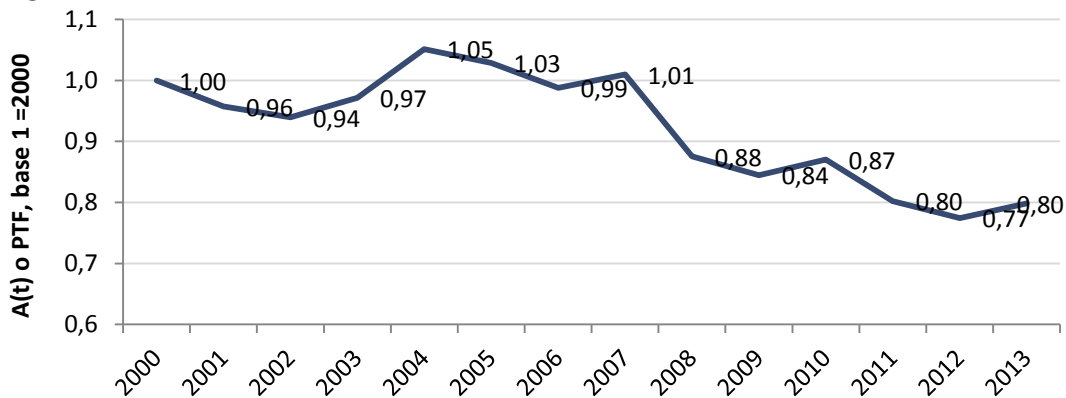
## 1. Resumen Ejecutivo

La productividad y su medición es un tema que se ha instalado dentro de la agenda minera en los últimos años. Sobre todo considerando alza en los costos de producción por el aumento de los precios de la electricidad, mano de obra y la escasez de agua, entre otros. En este sentido, el uso eficiente de los recursos productivos es de suma importancia para la sustentabilidad de la industria en el mediano y largo plazo. Son varias las instituciones, en las cuales se incluye Cochilco, que han medido la productividad en la minería del cobre, presentando resultados que en general van a la baja durante los últimos 10 años. Este estudio tiene por objetivo medir la productividad en minería a través de la Productividad Total de Factores (PTF), donde se incluye el recurso geológico como una de las variables determinantes en la producción del sector. La medición de la productividad permitirá conocer su evolución en el tiempo y analizar posibles causas en su variación.

El concepto de productividad corresponde a la relación que existe entre la cantidad de insumos y recursos utilizados para la obtención de un producto determinado. En este sentido, la PTF se entenderá como la diferencia entre la producción real y el valor estimado de producción de una faena en particular en un tiempo dado, determinado por sus factores productivos. La función de producción estimada se calcula a través de una regresión lineal en base a datos históricos de los factores productivos considerados como explicativos (capital físico, dotación de personal, consumo energía, ley de cobre en mineral y la razón estéril mineral) sobre la especificación de un modelo de función de producción transcendental logarítmico.

En base a los datos históricos reales de producción y los factores productivos del periodo 2000 - 2013 se efectuó una regresión lineal para la estimación de una función de producción para la minería del cobre. De esta manera, fue posible estimar la PTF a nivel nacional, donde se determina que la productividad del sector ha disminuido en un 20% en el periodo de estudio.

**Figura 1** Evolución de la Productividad, medida como PTF, en la minería del Cobre.



**Fuente:** Elaboración propia.

La disminución de la PTF a través de la presente metodología indica aún una brecha de información que no es aportada por los factores productivos considerados. No obstante, es posible indicar que la productividad ha disminuido por factores que exceden la disminución de la calidad del recurso geológico, medido a través de la ley de mineral de cobre y la razón estéril mineral, por lo cual las principales características de la industria minera son recogidas, dejando la explicación de la caída de productividad a aquellas asociadas a la gestión empresarial, uso tecnológico o diferenciación del recurso humano.



**Contenido**

1.	Resumen Ejecutivo .....	2
2.	Introducción .....	6
3.	Antecedentes .....	6
4.	Metodología .....	7
4.1	Planteamiento del modelo.....	8
4.2	Variables productivas consideradas.....	9
4.3	Especificación del modelo.....	12
5.	Resultados .....	12
5.1	Productividad en la minería del cobre en Chile .....	12
5.2	Análisis de la productividad en la minería a cielo abierto .....	15
5.3	Relación entre la productividad y el ciclo de precios del cobre.....	17
6.	Comentarios Finales.....	19
7.	Referencias.....	20
8.	Anexos.....	22



## Índice de tablas

Tabla 1 Datos considerados en análisis.....	9
Tabla 2 Signo esperado de variables explicativas de producción.....	10
Tabla 3 Estadísticas descriptivas de faenas de cobre chilenas en el periodo 2000 – 2013. ....	11
Tabla 4 Matriz de correlación de variables estudiadas.....	11
Tabla 5 Coeficientes estimados en la función de producción de la Minería en Chile.....	13
Tabla 6 Coeficientes estimados en la función de producción de la Minería a cielo abierto.....	15
Tabla 7 Relación entre precio del cobre y productividad en la minería del cobre en Chile. ....	17
Tabla 8 Estadísticas de regresión de la especificación modelo (4) .....	23
Tabla 9 Análisis de varianza de la especificación modelo (4).....	23
Tabla 10 Estadísticas de regresión de la especificación modelo (5) .....	24
Tabla 11 Análisis de varianza de la especificación modelo (5) .....	24

## Índice de figuras

Figura 1 Evolución de la Productividad, medida como PTF, en la minería del Cobre.....	2
Figura 2 Evolución de la PTF en la Minería en Chile 2000 - 2013 .....	14
Figura 3 Evolución de la PTF en minería a cielo abierto, año base 2000. ....	16
Figura 4 Comparación en evolución de la PTF en minería y el precio real del cobre 2000 - 2013. 18	
Figura 5 Índices de factores de producción en la minería del cobre en Chile. ....	22
Figura 6 Representatividad de muestra sobre producción chilena de cobre.....	22
Figura 7 Histograma del residuo de la especificación modelo (4) .....	23
Figura 8 Histograma del residuo de la especificación modelo (5) .....	24



## 2. Introducción

En la economía, los temas relacionados con el uso eficiente de los recursos han sido foco de atención de los especialistas, destacando la búsqueda por encontrar datos que corroboren la teoría y plantear distintos modelos que permitan explicar la producción. En esta materia, los análisis, estudios e investigaciones sobre la productividad han ahondado en distintas metodologías que entreguen la mayor información del concepto de productividad y sobre los elementos determinantes que explican las variaciones de la misma.

La industria minera en particular no ha estado exenta de la búsqueda por profundizar en los elementos que explican y miden su productividad. En ella se conjugan diversos factores que la diferencian de otras industrias, principalmente las relacionadas a la cantidad y calidad del recurso natural como un elemento significativo en la producción del bien final.

En particular, nuestro país ha enfrentado un escenario en que el positivo ciclo de precios de los *commodities* ha significado una búsqueda constante por el aumento de la producción, lo que puede incidir en ineficiencias productivas por la expectativa de un mayor retorno financiero. Además, la madurez de varios yacimientos y la caída de la calidad del recurso mineral contribuyen a la preocupación del sector por mantener su liderazgo en la minería del cobre a nivel mundial al aumentar los costos de producción. Si bien varios agentes han intentado demarcar una ruta para explicar las variaciones productivas, aun no se realiza consenso en el sector sobre la manera óptima de enfrentar el tema.

El objetivo del presente estudio es cuantificar la evolución de la productividad del sector minero en Chile. En este sentido, se mide la productividad como la evolución de la Productividad Total de Factores (“PTF” o “A”). De esta manera, la tasa de crecimiento del sector se calcula a través de una función estimada de producción basada en información histórica de insumos involucrados en la producción en faenas de la minería del cobre en Chile.

El estudio se estructura de la siguiente manera. Primero, se presentan antecedentes bibliográficos de autores sobre la cuantificación de la productividad en la economía y específicamente en el sector minero. Segundo, se muestra la metodología empleada donde se indican los supuestos y el planteamiento del modelo. En tercer lugar, se analizan los principales resultados del estudio. Por último, se entregan comentarios finales y principales conclusiones.

## 3. Antecedentes

La literatura referida a la cuantificación de la productividad es amplia, pudiendo situar referencias desde los trabajos sobre funciones de producción (Cobb y Douglas 1928, Solow 1957), que plantean un modelo básico para explicar lo que produce una economía ( $Y$ ) en virtud de 2 insumos principales como lo son los bienes de capital ( $K$ ) y trabajo ( $L$ ); donde, por ejemplo, la gestión de los insumos y/o el cambio tecnológico ( $t$ ) inciden directamente sobre la producción. Tal situación se modela a través de la ecuación:



$$Y = f(K, L; t).$$

Bajo la definición anterior, el efecto tecnológico o también llamado productividad total de factores (PTF), corresponderá a la porción de la producción no explicada por cambio en la dotación o stock de factores productivos o insumos. Sin embargo, como ha sido precisado por diversos autores, (Laserre y Ouellette 1988, Tilton y Landsberg 1997, Aydın y Tilton 2000, Rodríguez y Arias 2007, Zheng y Bloch 2013) la metodología para establecer funciones de producción y definir productividad, debe ampliarse para incorporar los efectos del recurso natural de manera separada, debido a su importancia relativa en las decisiones que ocurren en la industria minera. La situación anterior viene acompañada por una mayor disponibilidad de información y capacidad de procesamiento de datos, que permite incorporar distintas herramientas en la determinación de la productividad a partir de información micro económica o de cada firma (Bartelsman y Doms 2000, Stoker, y otros 2004).

En virtud de la información disponible, es factible medir productividad en base a funciones de producción o según funciones de costos y factores de demanda a través de la relación de dualidad desarrollada en la teoría de la función de producción (Griliches y Mairesse 1995).

Un aspecto relevante de la medición de productividad como residuo de funciones de producción (PTF) corresponde a la libertad sobre supuestos restrictivos como el hecho de operar en mercados competitivos, retornos constantes de escala o precios uniformes (Das 2012). Sin embargo, se presentan otros problemas de esta metodología, asociados principalmente a la simultaneidad de las variables explicativas de la producción (McCombie 1998).

Junto al tipo de metodología a utilizar, es necesario definir el tipo de función de producción para el planteamiento del modelo. Considerando los alcances sobre separabilidad de variables y homogeneidad de la función básica de Cobb – Douglas, los trabajos en la literatura económica optan por el uso de la función de producción transcendental logarítmica (Christensen, Jorgenson y Lau 1973, Pavelescu 2011).

En lo que respecta a la minería chilena, distintos trabajos (CORFO - UAI 2010 - 2014, COCHILCO 2013, CLAPES UC 2014) han mostrado una caída sistemática en los últimos años de la productividad del sector (medida como PTF). Del mismo modo, otros trabajos (COCHILCO 2009, Jara, Pérez y Villalobos 2010) muestran una tendencia negativa en la productividad laboral de la minería a partir del 2004, relacionándolo con el ciclo de precios altos.

#### **4. Metodología**

En este capítulo se indican las diferentes consideraciones y supuestos establecidos para determinar la productividad en la minería del cobre en Chile. En este sentido, la propuesta metodológica corresponde a la medición de la PTF a través de la estimación de una función de producción basada en una función transcendental logarítmica. Junto a lo anterior se efectúa un análisis de los datos empleados en el presente estudio, para mostrar su consistencia y el comportamiento de estos en el tiempo.



#### 4.1 Planteamiento del modelo

Una forma para medir la productividad de una industria es cuantificar la Productividad Total de Factores (PTF). La tasa de variación de la PTF corresponde a la diferencia entre la tasa de crecimiento de producción real y una tasa de crecimiento estimada por sus factores productivos. En este sentido, la PTF es una medida *de lo desconocido* la cual puede ser interpretado de múltiples maneras como por ejemplo: la variación de la producción debido a cambios tecnológicos, cambios culturales organizacionales, cambios en la gestión de la firma, distintas calidades de los insumos, entre otros. El cálculo del logaritmo de PTF se muestra en la ecuación (1).

$$\ln\left(\frac{\Delta A}{A}\right) = \ln\left(\frac{\Delta Q}{Q}\right) - \ln\left(\frac{\Delta \hat{Y}}{\hat{Y}}\right) \quad (1)$$

Donde,

- $A$ : Corresponde a la productividad total de factores o PTF. Se entiende como la variación en la producción que no es explicado por el incremento o disminución de los factores productivos.
- $Q$ : Producción real anual de una industria y/o firma.
- $\hat{Y}$ : Producción estimada en función según sus factores productivos.

La dificultad entonces recae en la estimación de una función de producción  $\hat{Y}$  del sector minero. Una alternativa viable, de acuerdo a la literatura existente, es la estimación de una función producción transcendental logarítmica que corresponde a una generalización de la función básica de Cobb – Douglas (Christensen, Jorgenson y Lau 1973, Pavelescu 2011)). Esta función considera los alcances sobre separabilidad y homogeneidad de la función original Cobb-Douglas, y además permite relajar la restricción economías constantes de escala del modelo de Solow impuesto en la medición de la PTF, ya que utiliza un método de regresión lineal para su estimación. La función transcendental logarítmica se muestra en (2)

$$\ln(\hat{Y}) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \ln(X_i) + \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \beta_{ij} \cdot \ln(X_i) \cdot \ln(X_j) \quad (2)$$

Donde,

- $\hat{Y}$ : Logaritmo de producción estimada.
- $X_{i,j}$ : Principales factores productivos que determinan la producción de una industria o firma. Típicamente se utiliza K=capital, L= trabajo, E=energía, entre otros.
- $\alpha_{i,j}$  y  $\beta_{i,j}$ : Coeficientes a ser determinados a través de un método de regresión que acompañan a los factores productivos.

De esta manera la función de producción en minería se podrá estimar a través de una regresión lineal, utilizando mínimos cuadrados ordinarios (MCO). Los datos anuales corresponden a variables de producción y a variables consideradas como factores productivos por cada faena.



## 4.2 Variables productivas consideradas

Las variables productivas que inciden y determinan la producción en diferentes industrias exceden al capital y el número de trabajadores. Por este motivo, se debe determinar qué insumos adicionales son relevantes y significativos en la producción. En el caso de la industria minera, sin duda, el recurso geológico es un factor productivo que determina la producción del sector.

Para la estimación de la función de producción de cobre para el presente estudio los factores productivos significativos corresponden a: Capital en equipos (maquinarias y plantas), dotación de personal, consumo total de energía y la calidad del recurso geológico. El recurso geológico es modelado utilizando la ley del mineral, que corresponde a una aproximación de la calidad del mismo, y la utilización de la variable razón estéril mineral que es una aproximación del esfuerzo relativo a su extracción.

Por otro lado, la variable a ser explicada es la producción de cobre en la minería chilena. Para los casos de minas con productos mineros adicionales al cobre, el nivel de producción es llevado a cobre equivalente, en virtud de los precios al año 2013, evitando incluir sesgo por variación de precios de subproductos. De este modo, la producción queda definida por el tonelaje de cobre equivalente en cada faena. La definición de las variables y su fuente se muestra en la Tabla 1

**Tabla 1** Datos considerados en análisis.

Variable	Unidad	Descripción	Fuente
Producción (Q)	TMF	Corresponde a la cantidad de cobre fino equivalente contenido en productos de cobre y otros minerales producidos las principales faenas mineras del país.	COCHILCO
Capital Físico (K)	Millones de \$US 2013	Corresponde a la cuantificación de capital físico acumulado en propiedades, plantas y equipos en unidades monetarias en las diferentes faenas mineras.	Estados financieros
Dotación de Personal (L)	# personas	Corresponde a la cantidad de trabajadores permanentes involucrados en procesos y actividades productivas dentro de las faenas mineras.	SERNAGEOMIN
Consumo energía (E)	GWh	Corresponde al consumo total de energía, lo que incluye electricidad y combustibles, por parte de las faenas mineras en el transcurso de un año.	COCHILCO
Ley de cobre en mineral (Ley)	%	Corresponde a la ley promedio del mineral extraído en las faenas mineras que es procesado.	Cochilco-WoodMac
Razón Estéril Mineral (REM)	Un.	Es una medida relativa que se entiende como la profundidad de los yacimientos o el esfuerzo a aplicar para la extracción de una unidad más de mena.	COCHILCO - WoodMac

**Fuente:** Elaboración propia.

Los razonabilidad de los coeficientes que acompañan a las variables explicativas se indican en la Tabla 2. Se espera que los coeficientes de las variables de capital físico, la dotación de personal, consumo de energía y la ley de cobre tengan signo positivo, ya que se deduce intuitivamente que al aumentar su cantidad, estas inciden positivamente en el incremento de la producción. Por otro lado, la variable de la razón estéril mineral es una medida relativa de esfuerzo extractivo



utilizando el método de extracción a rajo abierto, por lo cual se espera que el signo que acompaña a esta variable sea negativo. En este sentido, a mayor acumulación de las variables positivas, se debería tener un efecto positivo en la producción, es decir, que debe manifestarse en un aumento en la producción de cobre fino. Lo anterior corresponde a un comportamiento general, y no particular, por lo que debe tomarse como una tendencia esperada más que una determinante obligatoria para cada dato de la muestra.

**Tabla 2** Signo esperado de variables explicativas de producción.

Variable	Unidad	Impacto en producción
Capital Físico (K)	Millones de \$US 2013	(+)
Dotación de Personal (L)	# personas	(+)
Consumo energía (E)	GWh	(+)
Ley de cobre en mineral (Ley)	%	(+)
Razón Estéril Mineral (REM)	Un.	(-)

**Fuente:** Elaboración propia.

Es importante mencionar que las variables de dotación de personal, consumo de energía, ley de cobre en mineral y la razón estéril mineral no requieren ningún tipo de tratamiento antes de su utilización en el modelo de regresión ya que se trata de unidades donde su valor nominal es invariante en el tiempo. Sin embargo, para el caso del capital físico, que es medido en unidades monetarias y afectadas por niveles de precios, se realizó un ajuste según el índice de precios de bienes de capital.

La base de datos utilizada para la estimación de la función de producción, considera la información de 26 faenas con cobre como producto principal en el periodo 2000 – 2013. De esta manera las series de tiempo más largas, por faena, corresponde a 14 años, que es el caso de 17 de un total de 26 faenas. Las faenas restantes poseen series de tiempo más cortas dado que sus operaciones entraron en operación en el periodo 2000 – 2013 o debido que los datos referidos a un año en particular no pudieron ser recopilados. Así el total de datos para cada una de las variables a considerar es de 316. En la Tabla 3 se indican los valores máximos, mínimos y la mediana de las variables consideradas en el modelo.

Adicionalmente, con motivo de presentar el comportamiento de los factores productivos en el tiempo se presenta la Figura 5 (ver anexo). En este se visualiza que la producción ha aumentado en un 28% en el periodo 2000 – 2013. Por otro lado la acumulación de capital físico ha aumentado casi 2,7 veces, la dotación de trabajadores casi 2,3 veces, los materiales en 3,8 veces y el consumo total de energía en 1,7 veces, situación se contrapone a una caída de la ley de un 37% desde los niveles iniciales.



**Tabla 3** Estadísticas descriptivas de faenas de cobre chilenas en el periodo 2000 – 2013.

Variable	Unidad	N° Faenas	N° Datos	Mínimo	Máximo	Mediana	Desviación estándar
Producción (Q)	TMF	26	316	17.916	1.551.792	135.047	254.907
Capital Físico (K)	Millones de US 2013	26	316	17.979	7.284.323	726.454	1.348.857
Dotación de Personal (L)	# personas	26	316	275	7.421	1.291	1.488
Consumo energía (E)	GWh	26	316	131	6.161	880	1.208
Ley de cobre en mineral (Ley)	%	26	316	0,15	1,81	0,84	0,33
Razón Estéril Mineral (REM)	n.a.	26	316	0,48	19,43	2,71	3,08

**Fuente:** Elaboración propia.

El uso de la función de producción debe considerar el problema asociado a la simultaneidad o multicolinealidad de las variables explicativas. Dadas las características de las variables y la manera en que se realiza la actividad minera, se deben tener en cuenta las relaciones que se dan entre los conceptos explicativos seleccionados. Esto quiere decir que a pesar de ser variables separadas (ninguna contiene a la otra directamente) si existen relaciones de dependencia, pues una mayor cantidad de plantas y equipos requerirá mayores cantidades de insumos para su operación.

Para clarificar la situación, la matriz de correlación entre las variables permite descartar la existencia de multicolinealidad exacta<sup>1</sup>. Sin embargo, se debe tener presente que el consumo de energía es una variable altamente correlacionada con las variables de capital físico (0,82) y consumo de energía (0,84), ya que se encuentra relacionada con el tamaño de los proyectos. Sin embargo, en este estudio se incorpora la variable de consumo de energía ya que es una *proxy* a la utilización del capital, además de ser un importante insumo en la producción minera. (Ver Tabla 4)

**Tabla 4** Matriz de correlación de variables estudiadas.

	<i>Q</i>	<i>K</i>	<i>L</i>	<i>E</i>	<i>Ley</i>	<i>REM</i>
<i>Q</i>	1,00					
<i>K</i>	0,85	1,00				
<i>L</i>	0,79	0,74	1,00			
<i>E</i>	0,91	0,82	0,84	1,00		
<i>Ley</i>	0,20	0,08	0,11	0,06	1,00	
<i>REM</i>	0,15	0,10	0,04	-0,23	0,15	1,00

**Fuente:** Elaboración propia.

<sup>1</sup> Se refiere a que ninguna variable sea combinación lineal de otra.

### 4.3 Especificación del modelo

De acuerdo a las variables consideradas y la estructura de la función de producción transcendental logarítmica, la especificación del modelo a estimar para la medición de la PTF queda definida en (3)

$$\ln(Q_{it}) = A_{it} + \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \ln(X_i) + \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \beta_{ij} \cdot \ln(X_i) \cdot \ln(X_j) \quad (3)$$

Donde,

- $Q_{it}$ : producción de cobre fino equivalente en la faena  $i$  en el tiempo  $t$ .
- $X_{i,j}$ : Principales factores productivos que determinan la producción de una industria o firma. En este caso se determinaron: Capital Físico (K), Dotación de Personal (L), Consumo energía (E), Ley de cobre en mineral (Ley), Razón Estéril Mineral (REM).
- $\alpha_{i,j}$  y  $\beta_{i,j}$ : Coeficientes a ser determinados a través de una regresión lineal utilizando MCO que acompañan a los factores productivos.

La especificación del modelo planteado se basa en el supuesto de invariabilidad temporal de los coeficientes de los factores productivos. De esta manera, cualquier cambio tecnológico, considerado disruptivo o marginal, será recogido por la PTF. Por otro lado, el modelo no hace diferenciaciones entre las faenas mineras, al suponer que la producción es explicada enteramente por sus factores productivos. En este sentido, las diferencias en producción en faenas mineras con iguales magnitudes en sus factores productivos quedarán explicadas de igual manera por la PTF.

## 5. Resultados

En este capítulo se presentan los principales resultados de este estudio.

### 5.1 Productividad en la minería del cobre en Chile

Al efectuar una regresión del modelo especificado en (3), los resultados preliminares entregaron información contradictoria. En primer lugar, la variable de dotación de personal y el consumo de energía fueron excluidas del modelo por presentar multicolinealidad entre los factores explicativos. Por otro lado, el valor que acompaña a la ley mineral pareciera estar sobre valorado debido a su alto peso relativo frente a los coeficientes de los demás factores productivos. Por este motivo, el modelo transcendental logarítmico presentado en (3), debió nuevamente ser especificado reduciéndose a una función de producción Cobb-Douglas ampliada, donde se conservan los factores productivos principales y no sus variables cruzadas, como se muestra en (4).



$$\ln(Q_{it}) = \alpha_K \cdot \ln(K_{it}) + \alpha_L \cdot \ln(L_{it}) + \alpha_E \cdot \ln(E_{it}) + \beta_{Ley} \cdot \ln(LeyCu_{it}) + \beta_{Rem} \cdot \ln(REM_{it}) + A_{it} \quad (4)$$

Donde,

- $Q_{it}$ : producción de cobre fino equivalente en la faena  $i$  en el tiempo  $t$ .
- $K_{it}, L_{it}, E_{it}$ : factores productivos no geológicos, específicamente el Capital físico, dotación de personal y la energía consumida por la faena  $i$  en el tiempo  $t$ .
- $LeyCu_{it}, REM_{it}$ : factores productivos geológicos correspondientes a la ley de mineral y la relación estéril mineral de la faena  $i$  en el tiempo  $t$ .
- $\alpha_K, \alpha_L, \alpha_E, \beta_{Ley}, \beta_{Rem}$ : Coeficientes de factores productivos a ser estimados en la función de producción en minería.
- $A_{it}$ : medición de productividad como residuo de funciones de producción (PTF) para la faena  $i$  en el tiempo  $t$ .

Al efectuar una regresión lineal utilizando mínimos cuadrados ordinarios en la especificación del modelo, mostrado en (4), se calcularon los coeficientes de cada variable en la función de producción de la industria minera del cobre. Al realizar la regresión se descartan los efectos de simultaneidad y multicolinealidad. En cuanto al análisis global de modelo se determina que la regresión muestra un  $R^2$ -ajustado de un 0,995 y un valor de F de la prueba de Fisher de 67525,5 (ver Tabla 9 en anexo). Adicionalmente, los coeficientes estimados individualmente son significativos al poseer estadísticos  $t$  mayor que 2,1 con una probabilidad al 95% como se visualiza en la Tabla 5.

**Tabla 5** Coeficientes estimados en la función de producción de la Minería en Chile

Factores Productivos	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
$K$	0,331	0,0258	12,80	1,96E-30
$L$	0,264	0,0483	5,46	9,71E-08
$Ley$	0,337	0,04928	6,844	4,11E-11
$E$	0,274	0,01788	15,31	8,37E-40
$REM$	2,91E-06	6,34E-07	4,59	6,35E-06

**Fuente:** Elaboración propia.

Los valores determinados para los coeficientes permiten reconocer la razonabilidad planteadas de los factores de producción. Esto quiere decir que los signos que acompañan a los coeficientes corresponden a los planteados inicialmente en el modelo, salvo el caso de la variable de razón estéril mineral, la cual posee un coeficiente positivo, pero muy cercano a cero. De esta manera, las variables explicativas significativas en el modelo corresponden al capital físico, la dotación de personal, el consumo energético y la ley del mineral. Por otro lado, también es importante destacar que la suma de los coeficientes en la función de producción estimada, como se visualiza

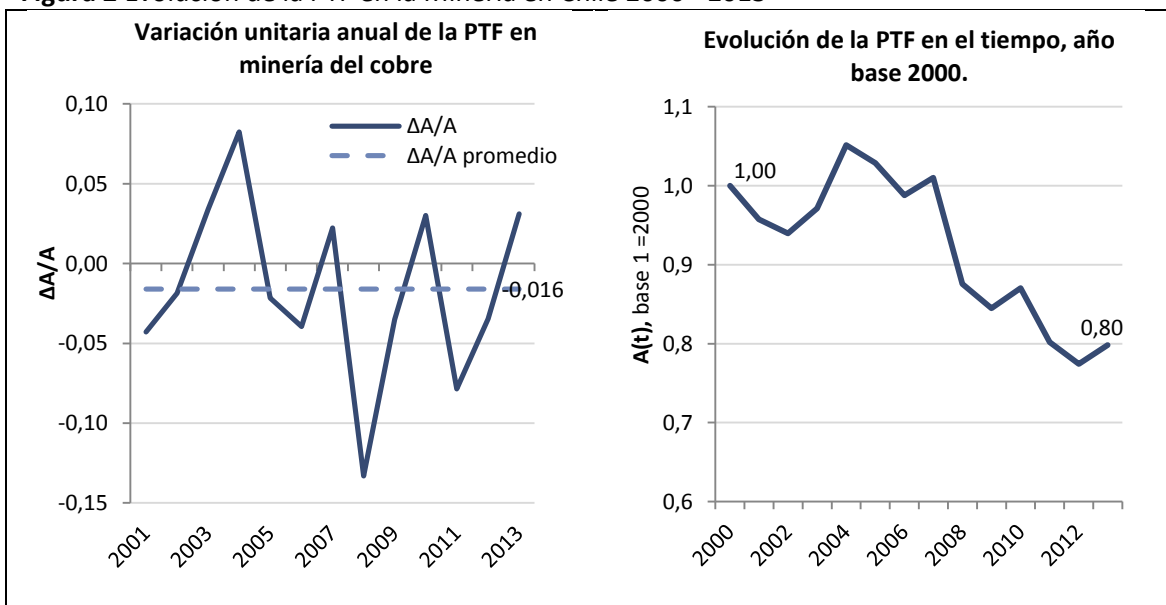
en (5), es mayor a uno lo que supondría economías de escala. Sin embargo, para precisar esta conclusión se requiere de un análisis y estudio particular de los datos.

$$Q_{it} = A_{it}K_{it}^{0,331}L_{it}^{0,264}E_{it}^{0,274}Ley_{it}^{0,337} \quad (5)$$

Utilizando la ecuación (5) se calcula la productividad por faena, la cual es finalmente ponderada según su peso relativo en la producción, lo que permite determinar la productividad nacional agregada en cada año.

Los resultados de la productividad nacional se muestran en la Figura 2. De estos resultados se puede determinar que la productividad ha disminuido en un 20% en el periodo 2000 – 2013. En promedio la productividad en la minería del cobre ha disminuido a una tasa anual de 1,6%, donde se visualizan dos periodos principalmente. El primero corresponde al periodo 2000 – 2004, donde la productividad experimenta una tasa de crecimiento promedio de un 1,4%. Sin embargo, en el periodo 2004 – 2013 la productividad en la minería disminuyó en una tasa promedio de un 2,8% anual.

**Figura 2** Evolución de la PTF en la Minería en Chile 2000 - 2013



Fuente: Elaboración propia.

Como se indicó el capítulo dos, la PTF captura los cambios en la producción que no están asociados a la variación de los factores productivos considerados en la función de producción. En este sentido, el modelo captura el efecto que produce la variación de la calidad del recurso natural en el tiempo, en este caso medido como la ley de mineral. De esta manera, la disminución de la ley de mineral de cobre es uno de los factores productivos que inciden en la disminución de la producción, pero no una de las variables que inciden en la disminución de la productividad, ya que esta se encuentra considerada dentro del modelo. Si existen variables geológicas que inciden en la productividad de la minería, como por ejemplo las especies

mineralógicas tratadas y la dureza del mineral, que no se encuentran en el presente modelo, eventualmente podrían influir de manera negativa en la productividad del sector. De esta manera, se puede inferir que los factores que posiblemente han determinado negativamente la productividad del sector se encuentran relacionados con la calidad del recurso humano a nivel operacional y gerencial, administración y gestión de los insumos productivos y el deterioro del recurso geológico que no es medido a través de la leyes de mineral ni la razón estéril mineral.

Adicionalmente es importante mencionar que el presente modelo no mide la utilización del capital físico, lo que puede estar provocando un sesgo en la medición de la productividad. En otras palabras, no incluye explícitamente una medida que pueda ponderar qué parte del capital físico fijo está siendo utilizado en la producción. Sin embargo, el modelo considera el factor productivo de la energía, el cual es una buena aproximación de la intensidad de uso del capital. A mayor cantidad de equipos funcionando dentro de una faena minera, mayor será su consumo eléctrico y de combustibles, por lo que se considera que este problema queda resuelto parcialmente.

## 5.2 Análisis de la productividad en la minería a cielo abierto

En el análisis anterior se midió la productividad de la minería considerando tres faenas mineras que utilizan un método de explotación subterráneo y 23 faenas a cielo abierto. Sin embargo, también corresponde analizar la productividad de la minería a cielo abierto, ya que ésta representa el aproximadamente el 90% de la producción de cobre fino de los datos recogidos en la muestra.

El análisis esta vez se realiza sobre 23 faenas a rajo abierto productoras de cobre para diferentes años. En este caso, el total corresponde a 276 datos para cada factor productivo considerado lo que permite realizar la estimación del modelo presentado en (4) a través de mínimos cuadrados ordinarios. Al igual que en el caso revisado en el punto 5.1, los resultados del modelo son estadísticamente significativos a nivel global y por coeficiente. De esta manera, la regresión del modelo posee un  $R^2$ -ajustado de un 0,995 y un valor de F de la prueba de Fisher de 56.463,3 (ver Tabla 11 en anexo). Además, los estadísticos t de los coeficientes que acompañan a los factores productivos al 95% de probabilidad son estadísticamente significativos

**Tabla 6** Coeficientes estimados en la función de producción de la Minería a cielo abierto.

Factores Productivos	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
<i>K</i>	0,316	0,0281	11,229	2,887E-24
<i>L</i>	0,237	0,0546	4,3491	1,938E-05
<i>Ley</i>	0,399	0,059	6,684	1,324E-10
<i>E</i>	0,295	0,021	14,011	6,782E-34
<i>REM</i>	-0,057	0,023	-2,454	0,014

Fuente: Elaboración propia.

Los factores productivos del modelo, para el caso de minería a cielo abierto, quedan determinados por: el capital físico, la dotación de personal, la energía consumida, la ley de mineral y la razón estéril mineral. Al igual que el caso anterior, la función de producción estimada corresponde a una Cobb-Douglas ampliada, la cual se muestra en (6)

$$Q_{it} = A_{it} K_{it}^{0,316} L_{it}^{0,237} E_{it}^{0,295} Ley_{it}^{0,399} REM^{-0,057} \quad (6)$$

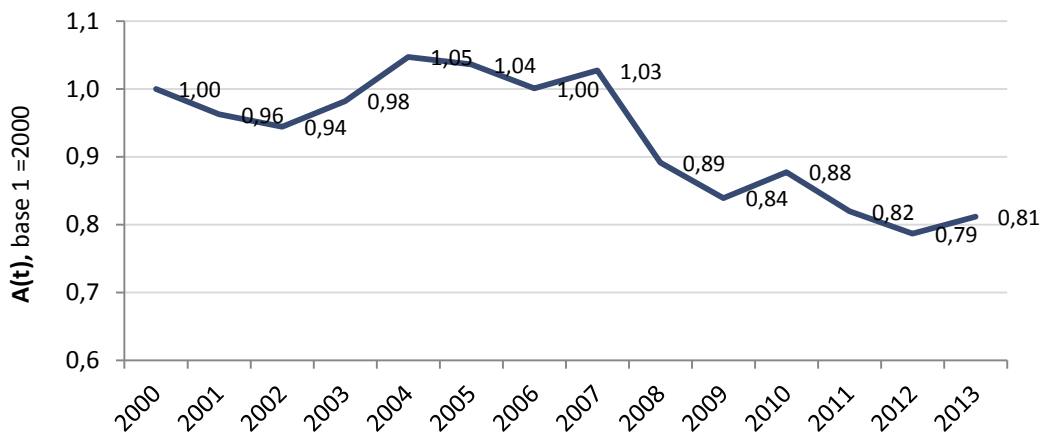
Cuando se analiza el caso de minería a cielo abierto, es interesante notar que el factor productivo Razón estéril-mineral se vuelve significativo y de signo negativo el cual captura el agotamiento del recurso natural por el aumento de la profundidad relativa en la extracción de mineral. Sin embargo, el coeficiente que acompaña a esta variable es pequeño, en términos de orden de magnitud, en comparación con los demás coeficientes de las variables productivas del modelo. En este sentido, de acuerdo a los datos estudiados, el aumento en la razón estéril mineral tiene como consecuencia la disminución en la producción de cobre aunque de manera marginal.

Por otro lado, en el caso de la minería a cielo abierto, es importante notar que el coeficiente que acompaña a la ley del mineral aumenta su magnitud alcanzando un 0,399 como se muestra en la Tabla 6, en comparación con el valor del mismo coeficiente de la minería nacional determinado con un valor de 0,337 (ver Tabla 5).

Cuando se analiza la PTF del sector, calculada como la adición ponderada de producción de cobre equivalente de cada mina considerada en este análisis para un año específico, se determina que ésta disminuye en un 19% en el periodo 2000 – 2013 (ver

Figura 3). Se reconoce un periodo de variación de la PTF en el periodo 2000 – 2006, en donde la PTF en promedio permanece estable. En el periodo 2007 – 2013 la productividad total de factores para la minería a cielo abierto disminuyó en una tasa anual de un 3,8%. En donde, la variación de mayor magnitud, a la baja, ocurre en el periodo 2007/2008 donde la PFT disminuye en un 13%, y luego continua con una tendencia hasta alcanzar su valor mínimo en el año 2012.

**Figura 3** Evolución de la PTF en minería a cielo abierto, año base 2000.





**Fuente:** Elaboración propia.

La productividad en minería medida como PTF no permite determinar específicamente cuales son los factores productivos que inciden en la variación de productividad de la industria, pero si descartar aquellos ya incluidos en la función de producción considerada. De este modo, dos importantes variables no han podido ser estudiadas que intuitivamente son determinantes en la productividad de las industrias. La primera, corresponde a la *gestión de los recursos*, la cual se encuentra medida implícitamente dentro de la PTF. El problema recae entonces en determinar el valor de la PTF que es explicado por la *gestión de los insumos productivos*. La segunda variable, corresponde a la calidad del recurso humano. En el modelo solo se cuantifican la variación en su cantidad, pero se cuantifica su calidad y/o nivel de cualificaciones, lo cual es capturado por la PTF.

### 5.3 Relación entre la productividad y el ciclo de precios del cobre

La productividad en el sector minero toma especial relevancia cuando la brecha entre costos de producción y precio de mercado de los *commodities* se estrecha. En este sentido, pueden existir ineficiencias en la utilización de los insumos, y por ende pérdidas en la productividad cuando existen aumentos repentinos en los precios del cobre como ocurrió en el año 2004. Una hipótesis de trabajo plantea que esto ocurriría porque las firmas privilegiarían el aumento de la producción por sobre la utilización eficiente de los recursos para aumentar el retorno financiero sobre la inversión.

De esta manera se puede estudiar la relación de la productividad y el ciclo de precios históricos del cobre. Cuando se mide la correlación existente entre estas dos variables en el periodo 2000 - 2013, de acuerdo a los datos del presente estudio, se determina un valor de - 0,529 (ver Tabla 7). Esto es una correlación importante entre las variables, sin embargo, la correlación entre estas no determina causalidad, por lo que no podemos concluir que el ciclo de precios es el factor más importante que determina la productividad del sector. Sin embargo, pareciera ser una de las variables que requiere de mayor estudio, para determinar su incidencia real en la productividad del sector.

**Tabla 7** Relación entre precio del cobre y productividad en la minería del cobre en Chile.

	B.M.L./LME	A
B.M.L./LME	1	-
A	-0,529	1

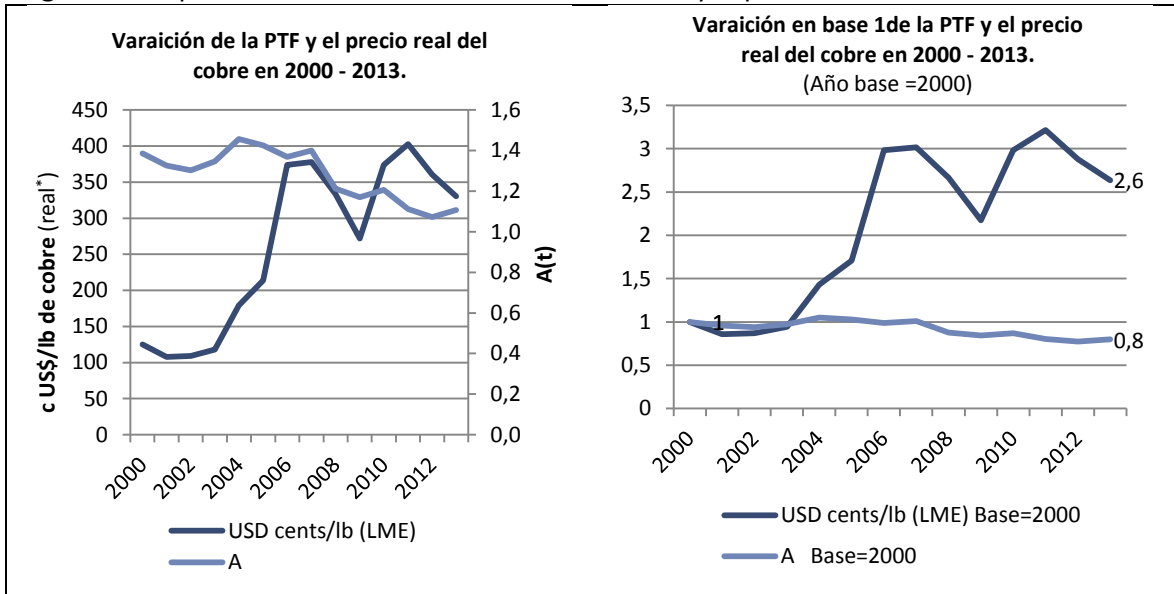
**Fuente:** Elaboración propia.

En la Figura 4 se muestra el comportamiento de las variables precio del cobre en términos reales y la productividad del sector minero en Chile medido como PTF. Se aprecia que mientras el precio del cobre subió un 260% real en el periodo 2000 - 2013, la PTF del sector disminuyó en un 20%. La mayor pérdida de productividad del sector ocurre en el periodo 2008 - 2013, en donde ya es reconocido el aumento del precio del metal en el tiempo por parte de la industria. De esta manera, se evidencia que a medida que los precios del metal rojo se han mantenido altos, ha



existido una pérdida de eficiencia en la utilización de los recursos en el sector, que excede a las variables estructurales estudiadas en el presente informe.

**Figura 4** Comparación en evolución de la PTF en minería y el precio real del cobre 2000 - 2013.



Fuente: Elaboración propia.

\*Deflactor: Índice de Precios al por Mayor de Estados Unidos (PPI, *all commodities*), base Promedio 2012=100.



## 6. Comentarios Finales

- Medir la productividad en minería es relevante ya que entrega información respecto de la gestión y utilización de insumos productivos, donde su uso eficiente es determinante para la sustentabilidad de la industria en el largo plazo.
- La productividad del sector minero ha disminuido aproximadamente 20% en el periodo 2000 - 2013.
- La especificación de un modelo de producción basado en una función Cobb-Douglas ampliada permite realizar una estimación de la productividad del sector. Además, los datos son suficientes para obtener una función de producción estimada estadísticamente significativa a nivel global y por factor productivo.
- Existe una serie de factores que afectan la productividad del sector minero. Sin embargo, a través de la medición de la PTF no es posible determinar específicamente qué variables causan la disminución de la productividad del sector, ya que corresponde a una combinación de aquellas variables que no se encuentran explícitamente en el modelo. En este sentido, es importante en futuros estudios ahondar en el análisis de aquellas variables que posiblemente afectan la productividad como la calidad del recurso humano u otros indicadores de calidad del recurso natural.
- La gestión de los insumos, sin duda afecta la productividad del sector minero. Este factor es capturado por la PTF, en donde es posible que se encuentre afectando negativamente a la productividad.
- Cuando se estudia la minería a cielo abierto de manera independiente, se determina que la razón estéril mineral es una variable explicativa en la producción de cobre, aunque de menor peso relativo frente a las demás variables explicativas consideradas en el presente estudio.
- El aumento del precio del cobre se encuentra correlacionado en un 53% con la disminución de la productividad en el periodo 2000 - 2013. Este hecho no denota causalidad entre las variables, pero la alta correlación nos indica que puede ser una de las variables explicativas en la disminución de la productividad. De esta manera, el aumento productivo tiene sentido económico cuando el valor marginal operacional es positivo, el cual depende del costo de producción de cada faena minera.
- La productividad del sector de la minería del cobre ha disminuido en el tiempo. Esto deteriora aun más la competitividad de la industria, sobre todo considerando que el mismo periodo de tiempo ha existido un aumento sostenido en los precios de los insumos de producción. En este sentido, la gestión y utilización eficiente de los recursos productivos es clave para el desarrollo de una minería sostenible y competitiva en el tiempo.



## 7. Referencias

Aydin, Hamit, y John Tilton. «Mineral endowment, labor productivity and comparative advantage in mining.» *Resource and energy economics*, 2000: 281-293.

Bartelsman, Eric, y Mark Doms. «Understanding productivity: lessons from longitudinal microdata.» *Journal of Economic Literature (Federal Reserve )*, 2000: 569-594.

Christensen, Laurits, Dale Jorgenson, y Lawrence Lau. «Transcendental logarithmic production frontiers.» *The Review of Economics and Statistics*, 1973: 28-45.

CLAPES UC. Índice para la medición de la productividad en Chile. Santiago, 26 de Agosto de 2014.

Cobb, Charles, y Paul Douglas. «A theory of production.» *American Economic Association*, 1928: 139-165.

COCHILCO. «Con buenos yacimientos no alcanza: análisis y evolución de la productividad laboral en Chile.» Santiago, 2009.

COCHILCO. «Una mirada a la productividad del sector minero en Chile.» Santiago, 2013.

CORFO - UAI. «Evolución de la PTF en Chile.» *Boletín Trimestral*, Santiago, 2010 - 2014.

Das, Amarendra. «Who extracts minerals more efficiently - Public or private firms? A study of Indian mining industry.» *Journal of Policy Modeling*, 2012: 755-766.

Griliches, Zvi, y Jacques Mairesse. *Production functions: the search for identification*. Working Paper, Cambridge: National Bureau of Economic Research, 1995.

Jara, Joaquín, Patricio Pérez, y Pablo Villalobos. «Good deposits are not enough: mining labor productivity analysis in the copper industry in Chile and Peru 1992 - 2009.» *Resources Policy*, 2010: 247 - 256.

Laserre, Pierre, y Pierre Ouellette. «On measuring and comparing total factor productivities in extractive and non - extractive sectors.» *The Canadian Journal of Economics*, 1988: 826-834.

McCombie, J. «Are there laws of production?: an assement of the early criticisms of the Cobb - Douglas production function.» *Review of Political Economy*, 1998: 141-173.

Pavelescu, Florin. «Some aspects of the translog production function estimation.» *Romanian Journal of Economics*, 2011: 131-151.

Rodríguez, Xosé Antón, y Carlos Arias. «The effects of resource depletion on coal mining productivity.» *Energy Economics*, 2007: 397-408.

Solow, Robert. «Technical change and the aggregate production function.» *The review of economics and statistics*, 1957: 312-320.

Stoker, Thomas, Ernst Berndt, Denny Ellerman, y Susanne Schennach. «Panel data analysis of U.S. coal productivity.» *Journal of Econometrics*, 2004: 131-164.



Tilton, John, y Hans Landsberg. Innovation, productivity growth, and the survival of the U.S. Copper industry. Washington: Resource for the future, 1997.

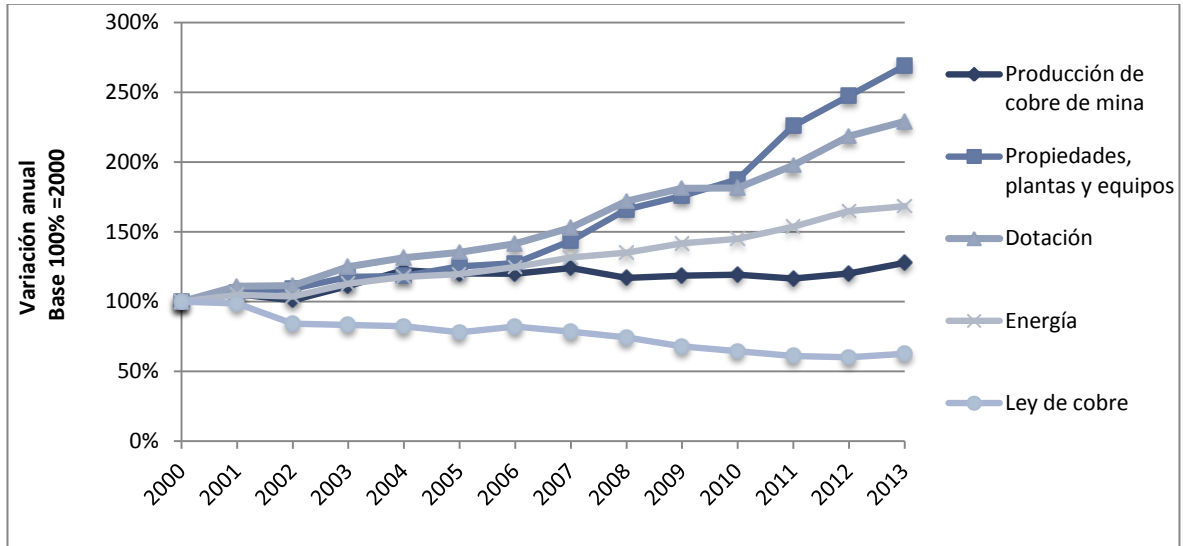
Zheng, Simon, y Harry Bloch. «Australia's mining productivity decline: implications for MFP measurement.» Journal of Productivity Analysis, 2013: 201-212.



## 8. Anexos

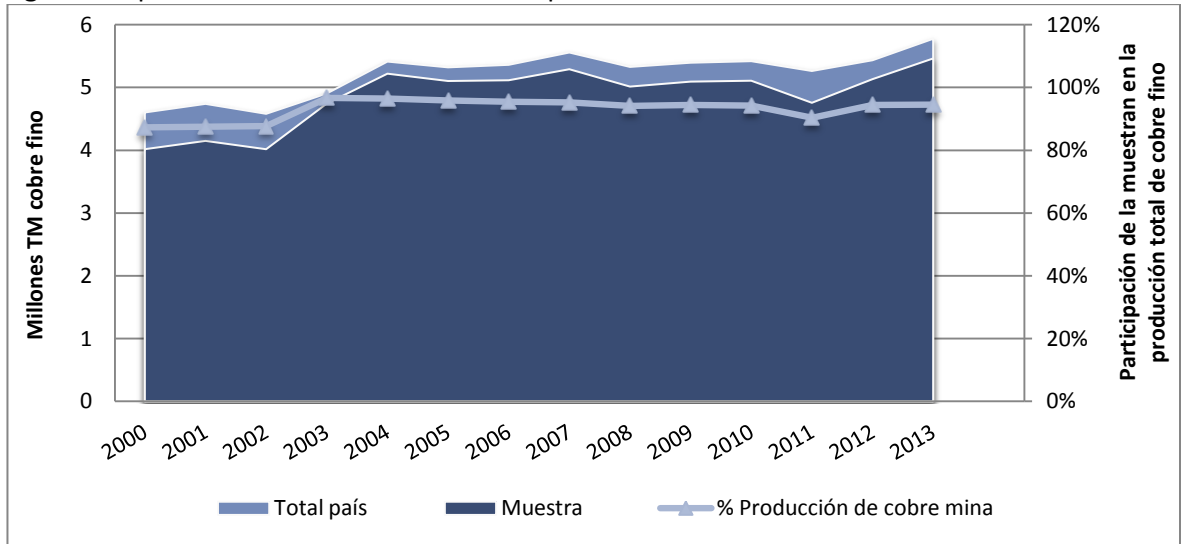
### 8.1. Información adicional de la sección 4.

**Figura 5** Índices de factores de producción en la minería del cobre en Chile.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 6** Representatividad de muestra sobre producción chilena de cobre.



Fuente: Elaboración propia.



## 8.2. Información adicional de la sección 5.

**Tabla 8** Estadísticas de regresión de la especificación modelo (4)

Coefficiente de correlación múltiple	0,999538325
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,999076863
R <sup>2</sup> ajustado	0,995849556
Error típico	0,365577038
Observaciones	316

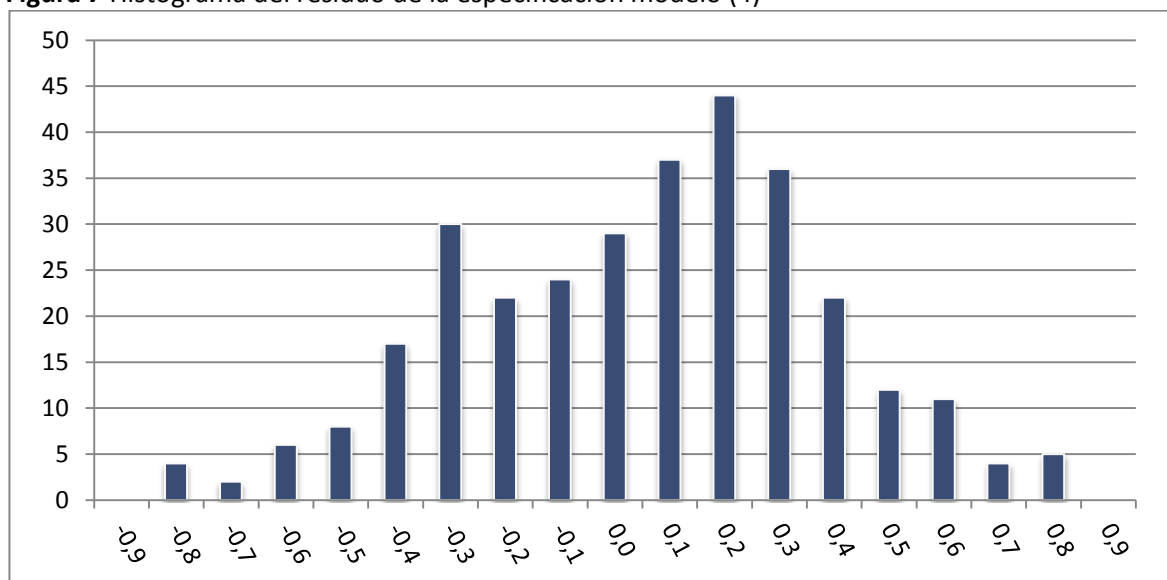
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 9** Análisis de varianza de la especificación modelo (4)

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	5	44794,10235	8958,820471	67525,53	0
Residuos	310	41,12865551	0,132673082		
Total	315	44835,23101			

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 7** Histograma del residuo de la especificación modelo (4)



Fuente: Elaboración propia.



**Tabla 10** Estadísticas de regresión de la especificación modelo (5)

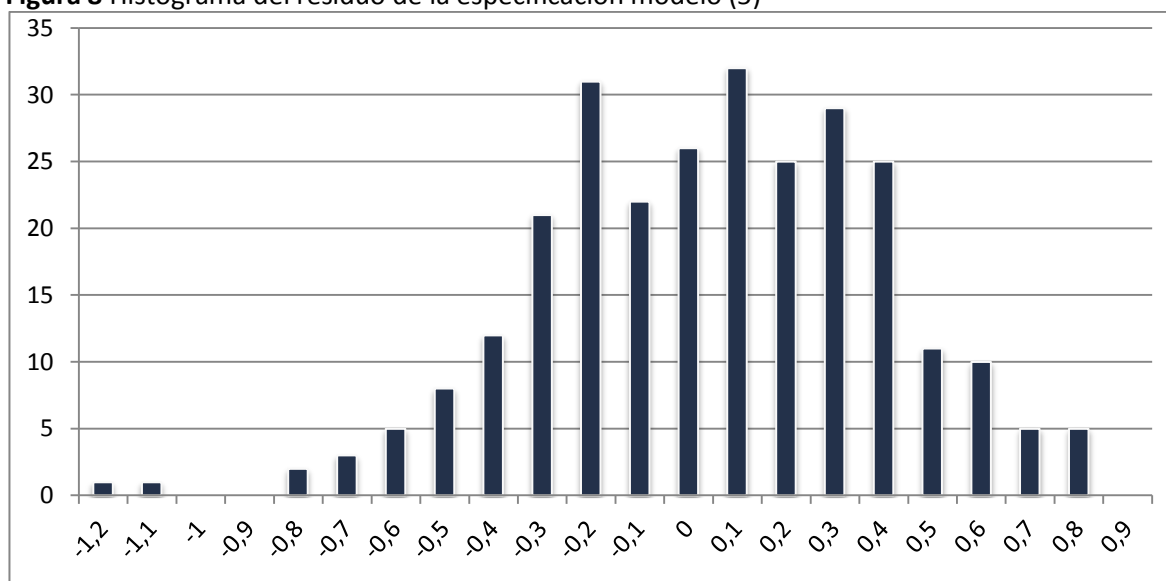
Coefficiente de correlación múltiple	0,99952216
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,99904454
R <sup>2</sup> ajustado	0,99532668
Error típico	0,37375836
Observaciones	275

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 11** Análisis de varianza de la especificación modelo (5)

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	5	39438,3037	7887,66074	56463,31	0
Residuos	270	37,7177338	0,13969531		
Total	275	39476,0214			

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 8** Histograma del residuo de la especificación modelo (5)

Fuente: Elaboración propia.





Este trabajo fue elaborado en la  
Dirección de Estudios y Políticas Públicas por

**Emilio Castillo Dintrans**

Analista Minero

**Sergio Verdugo Montenegro**

Analista Minero

**Jorge Cantallopts Araya**

Director de Estudios y Políticas Públicas

Diciembre/ 2014

