

## Input-Output table and Carbon Footprint: Estimation and Structural Decomposition Analysis

### **Autores:**

Simón Accorsi  
Ramón E. López  
Gino Sturla

Santiago, Diciembre de 2018

[sdt@econ.uchile.cl](mailto:sdt@econ.uchile.cl)  
[econ.uchile.cl/publicaciones](http://econ.uchile.cl/publicaciones)

---

# La matriz Insumo-Producto y la Huella de Carbono: Aplicación del Análisis de Descomposición Estructural

## Input-Output table and Carbon Footprint: Estimation and Structural Decomposition Analysis

Diciembre 2018

Simón Accorsi O.<sup>1</sup>

Ramón E. López<sup>2</sup>

Gino Sturla Zerene<sup>3</sup>

### Resumen

En este artículo comparamos dos metodologías para medir y asignar entre sectores productivos la huella de carbono para el caso chileno (2008-2013): la metodología de Balance Energético (BE), tradicionalmente utilizada por los *policy makers*, y una metodología que utiliza la información disponible en la Matriz Insumo-Producto (MIP). La metodología MIP, a diferencia de la BNE, considera las interacciones intra e inter-sectoriales a través de los flujos de inputs/outputs, obteniendo un indicador que mide de manera más precisa la huella de carbono atribuible a cada sector. En este sentido, la metodología BE subestima la huella atribuible al sector Minero y sobrestima las emisiones atribuibles a los sectores Transporte y Electricidad y Gas, lo cual tiene implicancias en los diseños de políticas de mitigación en general y en los efectos de esquemas de impuestos a las emisiones. En definitiva, el enfoque o metodología que se escoja para medir o cuantificar la huella de carbono no es inocuo, al menos a nivel sectorial. Esto es, diferentes metodologías reportan diferentes niveles de emisión sectoriales, aunque coinciden en el agregado.

Un segundo objetivo de este trabajo consiste en explotar la información utilizada en la metodología MIP para lograr una mejor comprensión de la dinámica que vincula el nivel de emisiones con las estructuras productivo/tecnológicas subyacentes. Para ello se realiza

---

<sup>1</sup> Profesor Asistente, Departamento de Derecho Económico, Facultad de Derecho, Universidad de Chile.

<sup>2</sup> Profesor Titular, Departamento de Economía, Facultad de Economía y Negocios, Universidad de Chile.

<sup>3</sup> Ingeniero Civil, Universidad de Chile. Doctor (c) en Economía, Universidad de Chile. Centro de Economía de los Recursos Naturales y el Medio Ambiente (CENRE), Facultad de Economía y Negocios, Universidad de Chile.

un Análisis de Descomposición Estructural (ADE) que permite desagregar los cambios en las emisiones en (i) efecto escala, (ii) efecto composición y (iii) efecto ingreso. Los resultados muestran que el efecto que en mayor medida determina el aumento de emisiones para el caso chileno es el efecto escala, seguido del efecto técnico. El efecto composición en tanto, se asocia con una reducción de las emisiones lo cual refleja el tránsito hacia una economía basada en mayor medida en servicios.

Keywords: carbon footprint, input-output tables, greenhouse gases emissions, structural decomposition analysis, scale effect, composition effect, technique effect.

JEL Classification: O13, Q01, Q42, Q56

Palabras clave: huella de carbono, matriz insumo-producto, emisiones de gases de efecto invernadero, análisis de descomposición estructural, efecto escala, efecto composición, efecto técnico.

## 1. Introducción

### *Lo que medimos importa*

El cambio climático expresado en la forma de calentamiento global ocasionado por la acción antropogénica es un hecho. En un meta-análisis de estudios publicados que considera más de mil autores, se concluye que existe más de un 90% de probabilidad que la causa de dicho calentamiento sea la acción humana en los últimos 50 años. (IPCC 2007).

Existe abundante evidencia que apunta a la existencia de (i) un aumento en el nivel y temperatura de los océanos, (ii) un aumento global de temperatura, (iii) la disminución del mar de hielo ártico, (iv) la disminución de los glaciares, (v) mayor frecuencia de eventos extremos (Church y White, 2011, Karl et al., 2009, Levitus et al., 2009)

En consecuencia, es un hecho cada vez más aceptado que lo que se ha denominado “el metabolismo socio-económico global” (Weinzettel et al., 2009, 2014), ha alcanzado niveles insostenibles de consumo de recursos y generación de residuos, lo cual implica una demanda de uso creciente sobre los recursos medioambientales y exige al medioambiente una mayor capacidad de absorción de emisiones y otros residuos. Pareciera ser que nos acercamos a un punto de transición crítica en relación al equilibrio entre el desarrollo económico/productivo y el entorno ecológico que hace posible dicho desarrollo (Barnosky et al., (2011), (2012)) por lo que resulta cada vez más relevante contar con indicadores o herramientas metodológicas que permitan esclarecer las relaciones entre la dinámica productiva y sus efectos sobre los eco-sistemas.

En términos prácticos, la elaboración y difusión de indicadores de sustentabilidad es un elemento esencial en el marco del diseño y seguimiento tanto de compromisos multilaterales como políticas nacionales orientadas a la disminución de emisiones de CO<sub>2</sub>. Lo que no medimos simplemente no existe y no es considerado en las políticas públicas ni en la orientación de la política de desarrollo, algo similar a lo que ocurre con indicadores agregados de calidad de vida (Genuine Progress Indicator, GPI) o de “bienestar económico sostenible” (Index of Sustainable Economic Welfare, ISEW) que pueda ir más allá del concepto de PIB per cápita. Como veremos además, la forma o metodología utilizada en la medición de alguna variable económica o de otro tipo, no es inocua respecto a los resultados.

En este trabajo se hace explícita la diferencia entre la metodología “convencional” o de “Balance Energético (BE)” y la metodología (MIP) para la medición de la huella de carbono. El principal aporte de la metodología MIP es que, a diferencia del enfoque convencional, incorpora la información disponible relativa a las interacciones económicas entre sectores. Las diferencias entre uno y otro enfoque implican entonces dos formas distintas de medir y asignar emisiones de carbono entre sectores por lo que llevan a conclusiones disímiles respecto a cuáles son los sectores relativamente más “sucios” o “limpios” en una economía, definiendo eventuales bases impositivas diferentes en un esquema de impuestos a las emisiones de carbono.

De esta manera se hace evidente la necesidad de contar con indicadores y herramientas metodológicas que permitan asignar correctamente las emisiones sectoriales para así identificar de manera adecuada los determinantes estructurales de dichas emisiones, posibilitando el diseño de políticas públicas coherentes orientadas a la sustentabilidad ecológico-económica de largo plazo.

El objetivo de este estudio es presentar los resultados de la aplicación de éstas metodologías para el caso chileno, una economía pequeña, abierta al comercio internacional, intensiva en la explotación de recursos naturales y de mediano nivel de desarrollo.

#### *Enfoques estructurales versus enfoques estadísticos*

El enfoque utilizado en el presente estudio para analizar las relaciones entre actividad productiva y emisiones es eminentemente “estructural”, ya que utiliza la información contenida en la matriz Insumo-Producto como reflejo de la estructura de la economía, en lo que se refiere a los flujos de bienes y servicios que presenta cada sector de la economía en relación a los otros.

Por otro lado existen los enfoques “econométricos”, basados en la búsqueda de regularidades empíricas que permitan establecer la existencia de una relación significativa entre las series de tiempo de algún indicador de emisiones y el PIB per cápita, lo que

origina la línea de investigación relacionada con la “Curva Ambiental de Kuznets”(EKC). El enfoque EKC estima una regresión del tipo:

$$\ln(E/P)_{it} = \alpha_i + \gamma_t + \beta_1 \ln(GDP/P)_{it} + \beta_2 (\ln(GDP/P)_{it})^2 + \varepsilon_{it}$$

Donde  $E$  son las emisiones,  $P$  es la población, los primeros dos términos del lado derecho corresponden al intercepto que puede variar por país y periodo, y  $GDP$  corresponde al Producto Interno Bruto. Los modelos en general se estiman utilizando datos de panel a través de los modelos de efecto fijo y efecto aleatorio con los resguardos usuales respecto a la consistencia de la estimación.

Una primera advertencia se refiere a recordar que, en el caso de poder realizar una estimación consistente a través del modelo de efectos fijos, los estimadores serán condicionales al país y el período por lo que cualquier extrapolación a otra potencial muestra resulta errónea y no es posible generalizar la existencia de dicha regularidad empírica.

Aún si se encontrara dicha regularidad, queda por abordar seriamente el problema de la cointegración de las variables. Este es un problema que en general no es abordado en los estudios sobre la EKC lo cual siembra la duda acerca de si las relaciones encontradas corresponden efectivamente a relaciones de largo plazo de las variables o simplemente corresponden al resultado de una relación espuria.

En general se toma como supuesto la cointegración de las variables y no se realiza el análisis estadístico adecuado (Galeotti, 2009). Existen por supuesto, estudios que sí realizan los tests de cointegración adecuados, aunque obteniendo resultados ambivalentes (de Bruyn, 2000, Perman y Stern, 2003, Coondoo y Dinda, 2002, Day y Grafton, 2003, Farhani y Ben Rejeb 2012), pero en general la conclusión es que los supuestos estadísticos sobre los que se ha basado tradicionalmente el análisis de la EKC no son robustos (Stern, 2004, Stern 2014).

Finalmente, el mero estudio empírico de los datos pierde riqueza si no viene acompañado de un adecuado marco teórico que primero identifique *conceptualmente* las variables a estudiar y plantee alguna hipótesis explicativa para las relaciones entre ellas, permitiendo además contar con ciertas predicciones testeables. Un análisis empírico adecuadamente diseñado no debiera olvidar aspectos tales como (i) la distinción entre sectores sucios y limpios, o más en general el fenómeno del cambio estructural, (ii) la elasticidad de sustitución entre factores productivos, (iii) los cambios tecnológicos y (iv) el entorno o marco institucional, entre otros (López et al., (2007), López (2010), López y Yoon (2014), Figueroa y Pastén, (2003), Antoci et al., (2010)).

El enfoque ADE en cambio, hace explícito el hecho de que la relación entre nivel de emisiones y PIB per cápita no es una regularidad empírica “dada”, sino que corresponde a

cambios en factores específicos bien identificados susceptibles de ser analizados. Esto constituye una ventaja de los enfoques estructurales al permitir desentrañar las relaciones profundas entre el nivel de emisiones de una economía y su nivel de desarrollo, medido por el PIB per cápita. Finalmente se considera que el conocer de mejor forma la estructura productiva subyacente y las interrelaciones sectoriales puede aportar al diseño de una adecuada política pública relativa a las emisiones de gases de efecto invernadero.

El trabajo se estructura de la siguiente manera: en la Sección 2 se aborda el problema del cálculo de la huella de carbono aprovechando la información disponible en la matriz Insumo-Producto. Se presenta la metodología para dicho cálculo y los resultados para el periodo estudiado. En la Sección 3 se presenta brevemente la metodología de análisis de descomposición estructural y los principales resultados de la descomposición. En la sección 4 se presentan las conclusiones y se discuten algunas implicancias para las políticas públicas.

## 2. Metodología y fuentes de los datos

### 2.1 El cálculo de la Huella de Carbono

La Huella de Carbono (HC) en términos genéricos se define como “el total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) causados por un sistema previamente definido, expresados en masa de CO<sub>2</sub> equivalente”. La HC se entiende entonces como una medida del impacto de las actividades humanas en el medioambiente, en términos del total de gases de efecto invernadero producidos, expresados en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente.<sup>4</sup>

Una excelente revisión de los diferentes conceptos utilizados en torno a la HC se puede encontrar en Wiedmann y Minx (2008) y Wright et al., (2011).

El enfoque utilizado en este trabajo tiene la ventaja de utilizar información agregada de fácil acceso y ser consistente respecto a los usos totales de energía. El enfoque que parte desde la información agregada para luego desagregar en sectores o eventualmente subsectores dependiendo de la información disponible, se denomina *top down* y es el utilizado en el presente estudio. A este enfoque se le denomina también “de responsabilidad del productor” o “basado en la producción”. El enfoque que parte del detalle del ciclo de vida del producto y “sube” desde las unidades productivas hacia mayores niveles de agregación, se denomina *bottom up*.

---

<sup>4</sup> Una excelente revisión de los diferentes conceptos utilizados en torno a la HC se puede encontrar en Wiedmann y Minx (2008) y Wright et al., (2011).

Ambos enfoques tienen ventajas y desventajas en lo relativo a la información necesaria para su aplicación y parte de los desafíos de la literatura relacionada con indicadores ecológico-económicos es encontrar un marco teórico que pueda integrar dichos enfoques.

Para proceder con el cálculo de la huella de carbono en base a la metodología que hemos escogido, se debe contar con la siguiente información (Munksgaard et al., 2009):

1. Una matriz insumo-producto que indique las transacciones monetarias ocurridas al interior de una economía. Esta matriz debe contener:
  - 1.1 Un vector  $x$  de dimensión  $[n \times 1]$  de producción doméstica, por sector industrial.
  - 1.2 Un vector  $Y$  de dimensión  $[n \times 1]$  de demanda final por sector industrial, incluyendo exportaciones.
2. Una matriz  $A$ , de dimensión  $[n \times n]$  indicando los requerimientos de inputs del sector  $j$  por bienes intermedios del sector  $i$ , por unidad monetaria producida en el sector  $j$ .
3. Una matriz de uso de energía, denominada  $E_{ind}$ , de dimensión  $[k \times n]$  indicando el uso de combustible del  $k$ -ésimo tipo por unidad de output en el sector industrial  $j$ .
4. Una matriz de uso de energía, denominada  $E_{fd}$ , de dimensión  $[k \times n]$  que contiene el uso por parte de los hogares del  $k$ -ésimo tipo de combustible por unidad monetaria de la demanda final de bienes del sector  $j$ .
5. Un vector  $C$  de dimensión  $[1 \times k]$  de emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad de combustible usado del  $k$ -ésimo tipo.

Los datos aquí utilizados y sus fuentes son

- i. Las Matrices insumo-producto de la economía chilena para los años 2008-2013 obtenidas del Banco Central de Chile.
- ii. El Balance Nacional de Energía para el periodo 2008-2013, obtenido de la Comisión Nacional de Energía (CNE), Ministerio de Energía.
- iii. Los factores de conversión para combustibles en términos de masa de CO<sub>2</sub> emitida por unidad de energía, obtenidos de IPCC 2006.

2.1.1. El enfoque convencional: La Metodología de Balance Energético

A continuación se presenta el enfoque que es usado tradicionalmente en los ámbitos de política pública para contabilizar las emisiones de CO2.

Se define,  $\delta_{ind}^{PR}$  como las emisiones de los diferentes sectores de la economía, excluyendo aquella parte de las emisiones que se destina a consumo final de los hogares. El total de emisiones correspondiente a la demanda final de los hogares se denomina,  $\delta_{fd}$ .

Para el cálculo de  $\delta_{ind}^{PR}$  se procede pre-multiplicando el vector  $x$  por el vector  $C$  y luego por la matriz  $E_{ind}$ , esto es:

$$\delta_{ind}^{PR} = CE_{ind}x \quad (1)$$

De forma similar se obtiene  $\delta_{fd}$ :

$$\delta_{fd} = CE_{fd}Y \quad (2)$$

De esta manera sumando (1) y (2) tenemos el total de emisiones producidas bajo la metodología de Balance Energético, que llamaremos  $\Omega_{\delta}$  :

$$\Omega_{\delta} = \delta_{ind}^{PR} + \delta_{fd} = CE_{ind}x + CE_{fd}Y \quad (3)$$

¿Cuál es el problema con este enfoque? El problema consiste en que al imputar simplemente los usos de energía de cada sector industrial, se desconoce el hecho que los sectores productivos de una economía *interactúan entre sí*, es decir, la producción de un sector sirve como insumo para los otros sectores y viceversa. Como veremos, esta distinción no genera problemas en el nivel agregado de emisiones, pero sí genera distorsiones relevantes en la asignación sectorial de las emisiones.

### 2.1.2 Metodología MIP

La metodología MIP recoge la información intersectorial contenida en la matriz Insumo-Producto de una economía explicitando el hecho que en la producción de un bien final de un determinado sector se utilizan insumos que corresponden a *outputs* provenientes del resto de los sectores de la economía (y también del mismo sector) y a su vez el producto de dicho sector sirve de insumo para otros sectores. Como se ha mencionado, a este enfoque también se le denomina “de responsabilidad del productor”. Al nivel de emisiones obtenido a través de esta metodología lo denominaremos  $\Omega_{\sigma}$ .



Este valor se obtiene sumando las emisiones totales de cada sector - considerando las interacciones - y las emisiones directas asociadas a la demanda final ( $\delta_{fd}$ ) tal como se especificó en la ecuación (2) de la sección anterior. Las emisiones sectoriales las denominaremos  $\sigma_{ind}$  y su cálculo se realiza de la siguiente forma:

$$\sigma_{ind} = \mathbf{CE}_{ind}(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{Y} \quad (4)$$

Donde  $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$  es la matriz inversa de Leontief obtenida a partir de la matriz insumo-producto. Combinando las ecuaciones (2) y (4) se obtiene una expresión del total de emisiones en CO2 equivalente basado en el enfoque de responsabilidad del productor, esto es:

$$\Omega_{\sigma} = \delta_{fd} + \sigma_{ind} = \mathbf{CE}_{fd}\mathbf{Y} + \mathbf{CE}_{ind}(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{Y} \quad (5)$$

El *total* de emisiones estimadas a través de las expresiones (3) y (5) es idéntico, pero difieren en su interpretación: mientras que el resultado obtenido en (3) contabiliza las emisiones sólo basándonos en el uso directo de combustible de cada sector, el resultado de (5) se ha obtenido a través de asignar las emisiones usando la inversa de Leontief y por ende captura los efectos indirectos de las emisiones de CO2 a través del proceso productivo. Esto es, la segunda metodología corrige eventuales sobre o sub estimación de emisiones para cada sector (comparando con el cálculo directo).

Debido a carencias en la información disponible, no fue posible realizar la desagregación para los sectores asociados a la producción de Cemento, Cal y Acero que en su conjunto representan el 8% de las emisiones.

Para determinar las emisiones de GEI del sector energético nacional y por ende de cada combustible utilizado en procesos productivos, se siguió la metodología señalada por el IPCC, que distingue entre las emisiones producto de la combustión, y aquellas que se generan como fugas o subproductos de los procesos productivos. La primera de ellas cuantifica las emisiones de CO2 basándose en dos métodos de cálculos específicos, el de consumos aparentes o balance energético, y el de usos finales o consumos finales.

La metodología IPCC 1996 define el Método de los Consumos Aparentes para estimar las emisiones de CO2 generadas a partir de la quema de combustibles que contienen carbono como parte fundamental de su estructura química; así una vez oxidados el carbón y el hidrógeno presente en ellos reaccionan con el oxígeno, produciendo CO2 y H2O. A su vez la metodología de Consumos Finales o Usos Finales estima las emisiones de CO2 generadas a partir del uso de combustibles en cada sector económico/productivo.

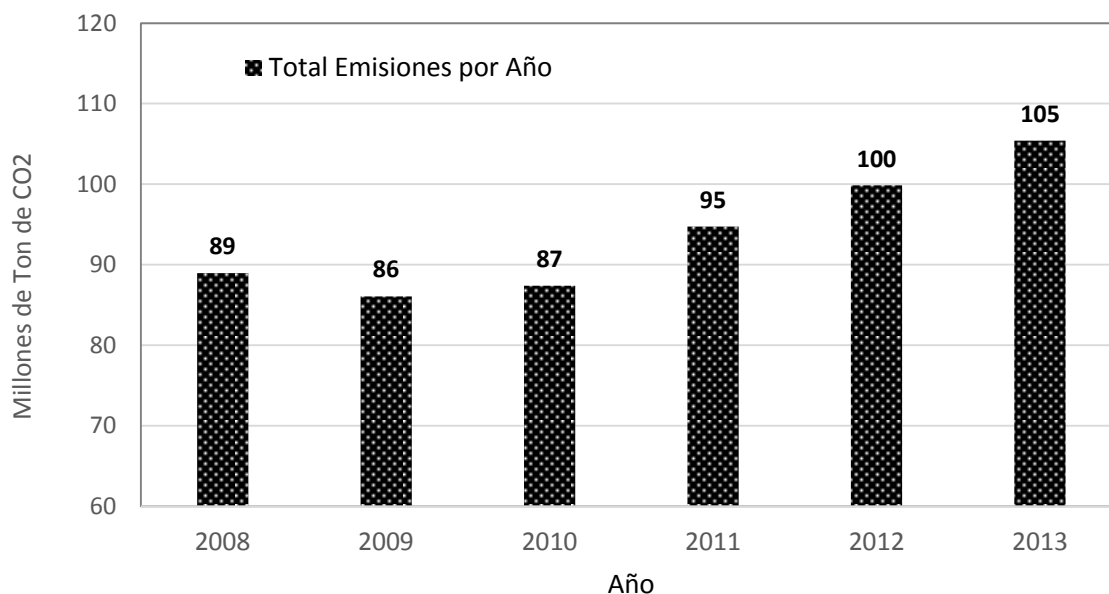
En el presente estudio se ha definido explícitamente la “Metodología de Balance Energético”, la cual para todos los efectos es asimilable a la metodología IPCC de Consumos Finales o Usos Finales, pues se asignan los combustibles a cada sector económico, incluyendo la electricidad y los procesos industriales.

La metodología BE del presente estudio ha considerado explícitamente los combustibles utilizados en los 12 sectores contenidos en la matriz insumo-producto para el caso de la economía chilena, incorporando además las emisiones asociadas a procesos industriales. De esta forma será posible realizar comparaciones consistentes entre las metodologías BE y MIP permitiendo visualizar las diferencias significativas en las emisiones de CO<sub>2</sub> estimadas para cada sector económico.

## 2.2 Resultados

### 2.2.1 Emisiones totales

Tal como se puede observar en la figura 1, a nivel agregado las emisiones de GEI en unidades de CO<sub>2</sub> equivalente pasaron desde 89 millones de toneladas en el año 2008 a 105 millones de toneladas para el año 2013 lo que significa un aumento de 18%.



**Fig. 1.** Emisiones totales de CO<sub>2</sub>. Cálculos propios.

Al calcular las emisiones por unidad monetaria de PIB se observa que este indicador se ha mantenido relativamente constante en torno a 0,92 toneladas/PIB (figura 2). Donde sí se

observa una tendencia es en el nivel de emisiones per cápita el cual ha pasado de 5,3 a 6 Ton de CO2 per cápita, un aumento del 13,2% para el periodo considerado (figura 3).

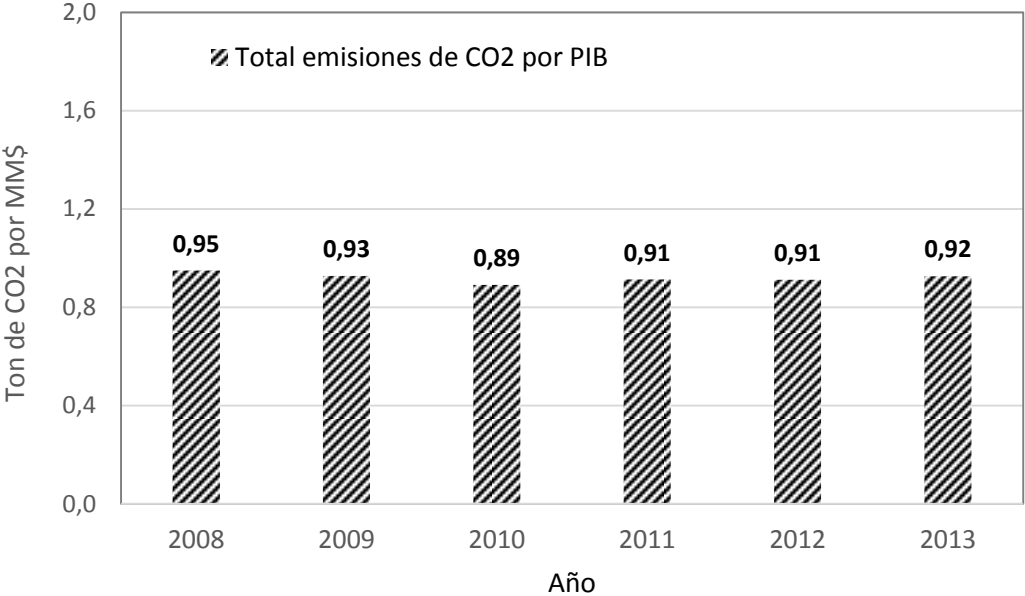


Fig. 2. Emisiones de CO2 por unidad de PIB. Cálculos propios.

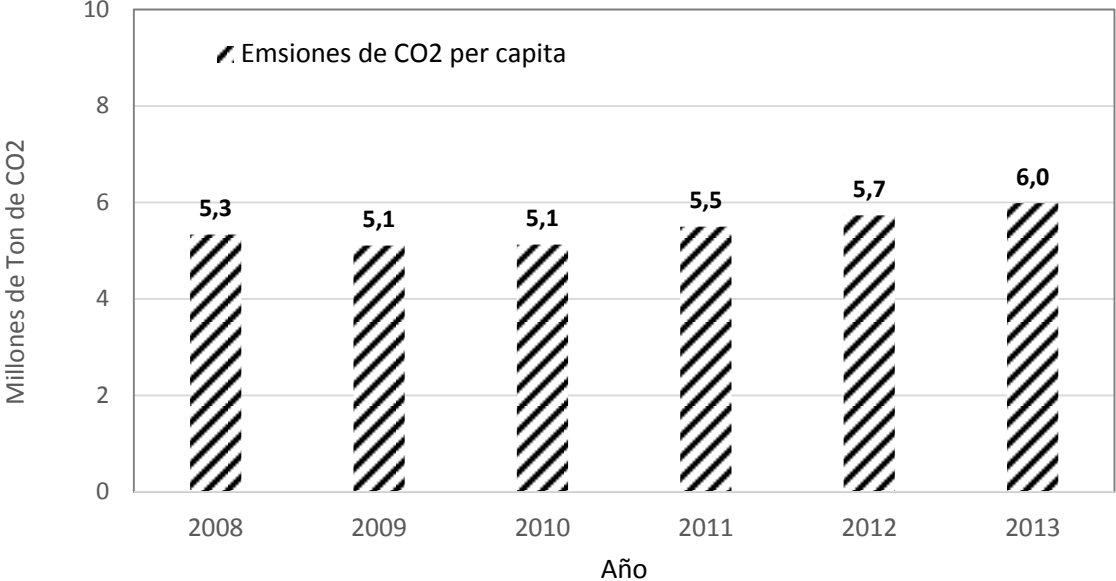
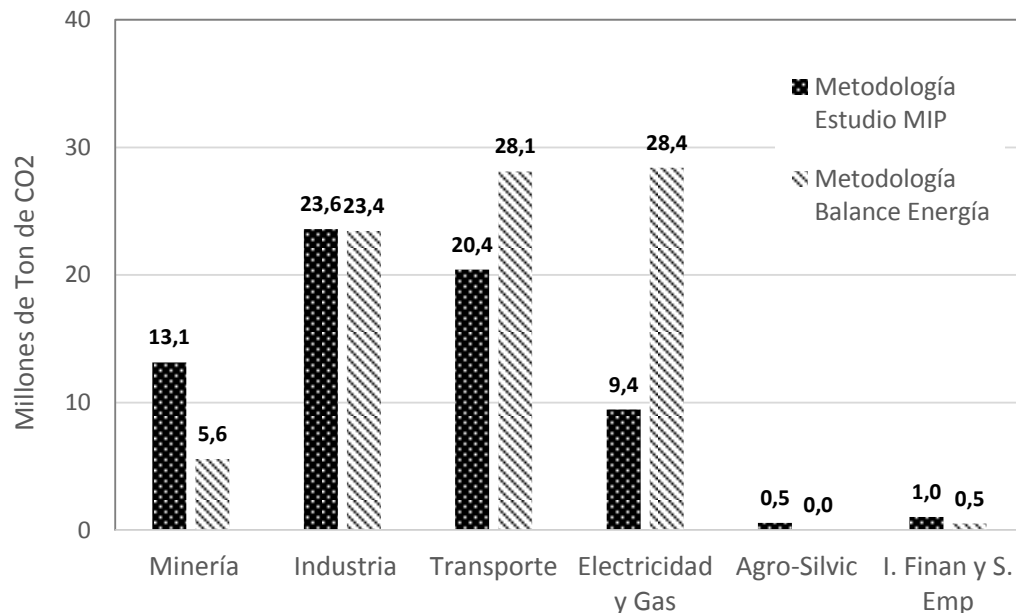


Fig. 3. Emisiones de CO2 per cápita. Cálculos propios.

### 2.3 Emisiones sectoriales: comparación entre metodologías

En la figura 4 se realiza una comparación para el año 2013, a nivel sectorial, de las dos metodologías expuestas. Como es de esperarse, el sector electricidad y gas aparece con una menor responsabilidad de las emisiones al realizar el cálculo a través de la metodología MIP, al igual que el sector transporte. Para el caso de la minería en cambio, se observa que el nivel de emisiones calculado utilizando la metodología MIP es mayor que calculado a través de BE. En los anexos se encuentra la comparación para el resto de los años.

Es importante mencionar que el balance de energía no presenta el consumo energético del sector Agropecuario-Silvícola, sin embargo la metodología MIP, al considerar los vínculos intersectoriales, sí permite tener una estimación en este sector.



**Fig. 4.** Comparación sectorial metodología MIP y metodología BE. Cálculos propios.

Como se indicó, la diferencia entre ambas metodologías radica en la consideración de las interacciones productivas entre sectores al asignar las emisiones a lo producido en un sector (ya sea final o intermedio). Por esta razón algunos sectores aparentemente “sucios” aparecen con menores emisiones en la medida en que actúan como sectores que proveen insumos o servicios a otros sectores.

Prácticamente no existen diferencias en los cálculos para el caso del sector Industria, pero se observan diferencias sustanciales en los sectores Minería, Transporte y Electricidad y Gas.

En el caso de la minería se observa que la metodología BE subestima la verdadera contribución de la Minería a las emisiones totales. Como se ha mencionado esto se debe a que el sector minero es usuario intensivo de inputs “sucios” o que traen incorporados un elevado nivel de emisiones. Lo contrario ocurre con los sectores Transporte y Electricidad y Gas, debido a que en general estos sectores operan como sectores intermedios proveyendo su output para producir bienes finales en otros sectores.

2.4 Evolución de emisiones sectoriales

Se presentan las emisiones sectoriales calculadas a partir de la metodología MIP, para los 6 sectores de interés del presente estudio. La figura 5 muestra la evolución sectorial de las emisiones. La figura 6 muestra las emisiones por unidad de valor agregado en cada sector. Se aprecia en que al corregir por valor agregado el transporte es por lejos el sector que más emite, seguido mucho más abajo por la industria, electricidad y gas y la minería.

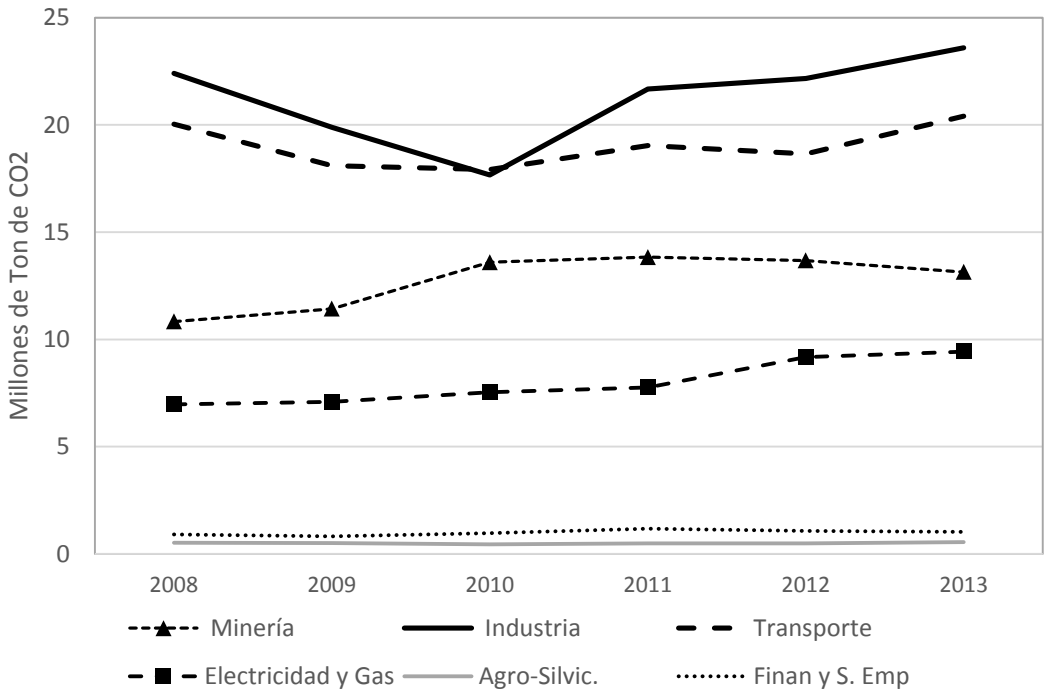


Fig. 5. Emisiones sectoriales (metodología MIP). Cálculos propios.

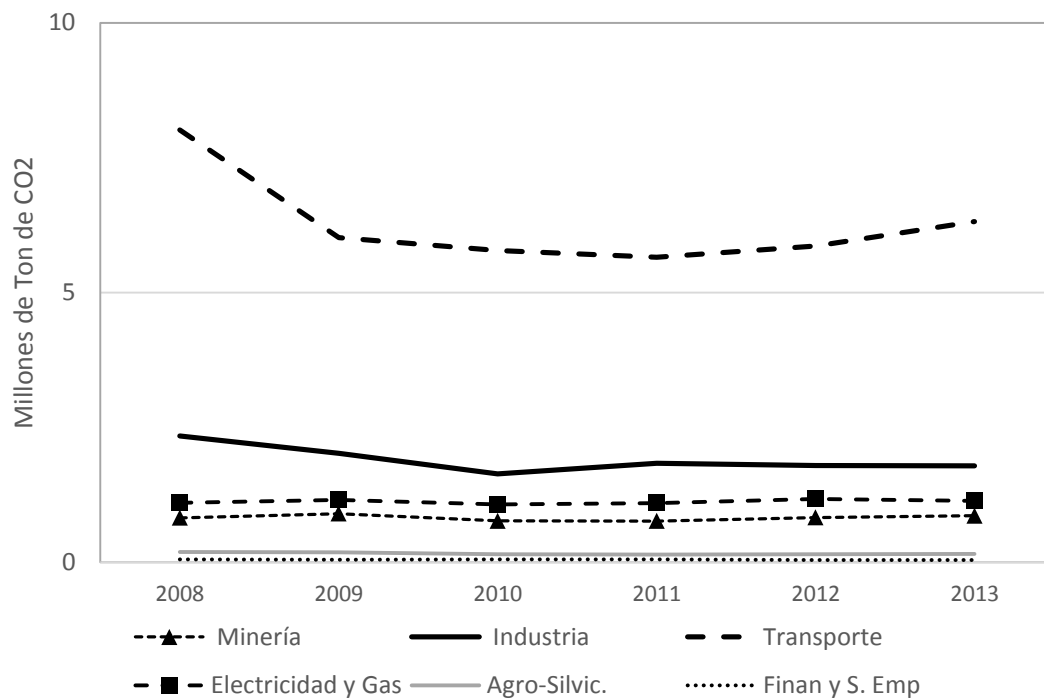


Fig. 6. Emisiones por unidad de valor agregado. Cálculos propios.

La tabla 1 muestra los valores asociados a las emisiones totales y de cada sector, la tabla 2 muestra las emisiones corregidas por valor agregado sectorial.

Tabla 1. Emisiones totales y sectoriales (2008-2013). Cálculos propios.

Año	Emisiones anuales	Minería	Industria	Transporte	Electricidad y Gas	Agro-Silvic.	I.Fin y S. Emp
2008	89,0	10,8	22,4	20,0	7,0	0,5	0,9
2009	86,1	11,4	19,9	18,1	7,1	0,5	0,8
2010	87,4	13,6	17,7	17,9	7,5	0,5	1,0
2011	94,8	13,8	21,7	19,0	7,8	0,5	1,2

Año	Emisiones anuales	Minería	Industria	Transporte	Electricidad y Gas	Agro-Silvic.	I.Fin y S. Emp
2012	99,9	13,7	22,2	18,7	9,2	0,5	1,1
2013	105,4	13,1	23,6	20,4	9,4	0,5	1,0

**Tabla 2.** Emisiones sectoriales por valor agregado. Cálculos propios.

Año	Minería	Industria	Transporte	Electricidad y Gas	Agro-Silvic.	I.Fin y S. Emp
2008	0,8	2,3	8,0	1,1	0,2	0,1
2009	0,9	2,0	6,0	1,2	0,2	0,0
2010	0,8	1,6	5,8	1,1	0,1	0,1
2011	0,8	1,8	5,7	1,1	0,1	0,1
2012	0,8	1,8	5,9	1,2	0,1	0,0
2013	0,9	1,8	6,3	1,1	0,2	0,0

### 3. Análisis de Descomposición Estructural

#### 3.1 Efecto Escala, Composición y Técnico: Aspectos conceptuales

El uso de la metodología de descomposición estructural permite aislar los efectos de los diferentes determinantes de una variable para el caso en que éstos determinantes estén en una relación multiplicativa. Un punto relevante a considerar es que no existe una única descomposición posible, por el contrario, en el caso de  $n$  determinantes, el número de descomposiciones posibles es  $n!$ , por lo que el investigador puede realizar ciertas manipulaciones ad-hoc en orden a encontrar resultados interpretables (Dietzenbacher y Los, 1998)

El SDA se ha vuelto cada vez más relevante como herramienta que permite desentrelazar el crecimiento de una variable en el tiempo, separando los cambios de los elementos constitutivos de la variable en cuestión.

La metodología del análisis de descomposición estructural (ADE) es análoga al concepto que está detrás de la metodología de contabilidad del crecimiento económico. El objetivo

en ambos casos es descomponer el crecimiento de una variable en cambios en sus determinantes. En el caso del crecimiento económico nos referimos al aumento o disminución de los inputs (capital, trabajo, recursos naturales) y a los cambios asociados a la tecnología reflejados en la productividad total de factores.

En el caso de la huella de carbono es posible una descomposición “exacta” en los diferentes determinantes a partir de la metodología expuesta en la sección anterior, con pequeñas modificaciones que facilitan la interpretación de la descomposición elegida. Es así como es posible agrupar dichos determinantes respectivamente en:

- (i) Un efecto escala, que refleja el hecho evidente de que, manteniendo constante los demás determinantes, un aumento en el nivel de producción conlleva un mayor nivel de emisiones y viceversa.
- (ii) Un efecto composición, que refleja los cambios en la participación relativa en la producción de los diferentes sectores, heterogéneos en términos de emisiones. En el caso de la huella de carbono, el efecto composición refleja específicamente si una determinada economía se ha movido hacia sectores más “sucios” o más “limpios” en términos de emisiones.
- (iii) Un efecto técnico, que recoge el efecto de producir a través de tecnologías o “combinaciones productivas” (de inputs, mix de combustibles y eficiencia energética) que pueden ser más o menos intensivas en emisiones por unidad producida. Como veremos a continuación, uno de los principales aportes del presente trabajo es el de proveer una descomposición para el efecto técnico que permite un entendimiento más acabado sobre los elementos que subyacen a este efecto.

### 3.2. Metodología de Descomposición Estructural

Sea  $Q_t$  el total de emisiones de carbono en el periodo  $t$ .  $Q_t$  se expresa de la siguiente manera:

$$Q_t = Q_t(\mathbf{C}_t, \mathbf{F}_t, \mathbf{E}_t, \mathbf{L}_t, \mathbf{Y}_t) = \mathbf{C}_t \mathbf{F}_t \mathbf{E}_t \mathbf{L}_t \mathbf{Y}_t \quad (6)$$

Donde  $\mathbf{C}$  es el mismo vector utilizado anteriormente ( $1 \times k$ );  $\mathbf{F}$  es una matriz de dimensiones ( $k \times n$ ) con elemento característico  $f_{ri}$  indicando la participación del  $r$ -ésimo combustible usado por el sector  $i$  respecto al total de combustible utilizado en dicho sector;  $\mathbf{E}$  corresponde a una matriz diagonal de dimensión ( $n \times n$ ) con elemento característico  $e_{ii}$ , que indica la intensidad de uso de energía para el sector  $i$ ; La matriz  $\mathbf{L} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$  de



dimensión (n x n) corresponde a la matriz inversa de Leontief que refleja las interdependencias sectoriales: Finalmente un vector Y que contiene la demanda final por cada sector.

Asimismo,  $Q_t$  puede expresarse como:

$$Q_t = Q_t(\mathbf{C}_t, \mathbf{F}_t, \mathbf{E}_t, \mathbf{L}_t, \mathbf{S}_t, y_t) = \mathbf{C}_t \mathbf{F}_t \mathbf{E}_t \mathbf{L}_t \mathbf{S}_t y_t \quad (7)$$

Donde S es un vector de estructura productiva con elementos  $s_i$ , indicando la participación de cada sector en relación a la producción total;  $y_t$  es un escalar correspondiente a la producción total.

Es sabido que existen múltiples formas en que se puede realizar una descomposición multiplicativa. En el presente trabajo se adapta la metodología utilizada por Zhang (2012) que está desarrollada específicamente para descomponer las emisiones incorporadas en la balanza comercial. A su vez, Zhang (2012) encuentra sus fundamentos conceptuales en los trabajos de Dietzenbacher y Los (1998) y Hoekstra y van der Bergh (2003).

Se define  $\Delta Q_t$  como el cambio en el total de emisiones entre el período t y t-1. Es decir  $\Delta Q_t = Q_t - Q_{t-1}$  siendo posible realizar la siguiente descomposición:

$$\Delta Q_t = C_t F_t E_t L_t S_t y_t - C_{t-1} F_{t-1} E_{t-1} L_{t-1} S_{t-1} y_{t-1} \quad (8)$$

$$\Delta Q_t = C_t F_t E_t L_t S_t \Delta y + C_t F_t E_t L_t S_t y_{t-1} - C_{t-1} F_{t-1} E_{t-1} L_{t-1} S_{t-1} y_{t-1}$$

$$\Delta Q_t = C_t F_t E_t L_t S_t \Delta y + C_t F_t E_t L_t \Delta S y_{t-1} + C_t F_t E_t L_t S_{t-1} y_{t-1} - C_{t-1} F_{t-1} E_{t-1} L_{t-1} S_{t-1} y_{t-1}$$

$$\Delta Q_t = C_t F_t E_t L_t S_t \Delta y + C_t F_t E_t L_t \Delta S y_{t-1} + C_t F_t E_t \Delta L S_{t-1} y_{t-1} + C_t F_t E_t L_{t-1} S_{t-1} y_{t-1} - C_{t-1} F_{t-1} E_{t-1} L_{t-1} S_{t-1} y_{t-1}$$

$$\Delta Q_t = C_t F_t E_t L_t S_t \Delta y + C_t F_t E_t L_t \Delta S y_{t-1} + C_t F_t E_t \Delta L S_{t-1} y_{t-1} + C_t F_t \Delta E L_{t-1} S_{t-1} y_{t-1} + C_t F_t E_{t-1} L_{t-1} S_{t-1} y_{t-1} - C_{t-1} F_{t-1} E_{t-1} L_{t-1} S_{t-1} y_{t-1}$$

$$\Delta Q_t = C_t F_t E_t L_t S_t \Delta y + C_t F_t E_t L_t \Delta S y_{t-1} + C_t F_t E_t \Delta L S_{t-1} y_{t-1} + C_t F_t \Delta E L_{t-1} S_{t-1} y_{t-1} + C_t \Delta F E_{t-1} L_{t-1} S_{t-1} y_{t-1} + \Delta C F_{t-1} E_{t-1} L_{t-1} S_{t-1} y_{t-1}$$

Donde el primer término del lado derecho de la última ecuación ( $C_t F_t E_t L_t S_t \Delta y$ ) corresponde al Efecto Escala y el segundo término ( $C_t F_t E_t L_t \Delta S y_{t-1}$ ) corresponde al Efecto Composición. Los siguientes términos de la suma dan cuenta del Efecto Técnico el cual a su vez se descompone en los siguientes elementos:

Efecto por al cambio en la composición de los inputs	$:C_t F_t E_t \Delta L S_{t-1} y_{t-1}$
Efecto por cambio en la intensidad de uso de energía	$:C_t F_t \Delta E L_{t-1} S_{t-1} y_{t-1}$
Efecto por cambios en el mix de combustibles	$:C_t \Delta F E_{t-1} L_{t-1} S_{t-1} y_{t-1}$
Efecto por cambios en los factores de emisión	$:\Delta C F_{t-1} E_{t-1} L_{t-1} S_{t-1} y_{t-1}$

Como resulta aparente, la forma de descomposición presentada en la ecuación 8 no es única. Dado que tenemos 6 factores que determinan las emisiones, existen  $n! = 6! = 720$  formas de descomposición. Seibel (2003) muestra que estas  $n!$  descomposiciones corresponden a  $2^{n-1}$  formas de descomposición por cada factor con frecuencias dadas por  $(n-1-k)!k!$ , donde  $k$  es el número de los factores que se mantienen constantes en  $t-1$  y el número de diferentes formas de descomposición de cada factor es  $((n-1)!/[(n-1-k)!k!]$ .

De esta forma se ha procedido a calcular todas las posibles descomposiciones, las que se han promediado para cada factor, siguiendo lo sugerido por Dietzenbacher y Los (1998).

### 3.3 Resultados del Análisis de Descomposición Estructural

Como se ha señalado, las emisiones de CO2 crecieron un 18% durante el periodo 2008-2013. Esto se refiere a las emisiones totales, esto es, las emisiones que van directamente a la demanda o consumo final de los hogares, más aquellas asociadas a los usos entre sectores. La metodología desarrollada en la sección anterior descompone esta última parte de las emisiones, que corresponde al segundo término de la ecuación (5). Este término en dicha ecuación corresponde a  $CE_{ind}(I-A)^{-1}y$ .

**Tabla 3:** Descomposición de emisiones de carbono

<b>Descomposición Cambio CO2</b>			<b>Efecto Técnico</b>					
<b>Periodo/Efecto</b>	<b>Efecto Escala</b>	<b>Efecto Composición</b>	<b>Sub-total</b>	<b>Input Mix</b>	<b>Uso de energía</b>	<b>Mix Combustible</b>	<b>Factores de Emisión</b>	<b>TOTAL</b>
2008-2009	-0,34	-1,08	-3,13	-1,45	-1,56	-0,13	0,00	<b>-4,55</b>
2009-2010	4,75	-0,64	0,97	-1,02	2,81	-0,81	0,00	<b>5,09</b>
2010-2011	4,84	0,04	3,96	0,89	2,63	0,44	0,00	<b>8,84</b>
2011-2012	2,55	-1,46	2,96	-0,54	3,28	0,22	0,00	<b>4,05</b>
2012-2013	3,15	-0,87	1,12	-1,97	2,60	0,49	0,00	<b>3,40</b>
<b>Total Periodo</b>	14,95	-4,00	5,87	-4,08	9,75	0,21	0,00	<b>16,83</b>
<b>2008-2010</b>	4,41	-1,71	-2,16	-2,47	1,25	-0,94	0,00	<b>0,54</b>
<b>2010-2013</b>	10,54	-2,29	8,04	-1,61	8,50	1,15	0,00	<b>16,29</b>

Los resultados indican que el principal determinante en el aumento de las emisiones en el período corresponde al efecto escala, seguido por el efecto técnico. El efecto composición en general se muestra como un determinante que reduce el nivel de emisiones, lo cual posiblemente corresponde al tránsito hacia una economía con mayor peso del sector servicios que presenta bajos niveles de emisiones.

La descomposición del efecto técnico también entrega luces interesantes, ya que se observa un menor nivel de eficiencia en el uso de la energía, es decir, se está utilizando cada vez más energía para generar una unidad de producto, manteniendo constante todos los otros factores. El efecto del mix de inputs ha permitido contrarrestar en parte esta menor eficiencia.

Si se espera poder reducir el nivel de emisiones o al menos “desacoplarlo” del PIB resulta fundamental comprender cuáles son los factores que están detrás y diseñar estrategias que puedan contrarrestar el efecto escala, en el entendido que la economía chilena es una economía de nivel medio de desarrollo y que mantiene perspectivas de crecimiento económico en el mediano y largo plazo. Una de las formas es considerar una política pública que se imponga metas ambiciosas en términos de la matriz energética, aprovechando las ventajas comparativas de la economía chilena en la generación de energía eólica, solar, geotérmica y mareomotriz. Por ejemplo Chile presenta el nivel de radiación solar más alto del mundo en el desierto de Atacama y cuenta con una extensa costa. Dado el nivel y el grado de incertidumbre de las inversiones necesarias, una política debe considerar elevados grados de cooperación público-privada.

Pero además se deben poner los incentivos adecuados. En este sentido es relevante apuntar a una mayor eficiencia energética estableciendo un mayor nivel de impuestos al carbono que posibilite una transición hacia energías más limpias y entregue la señal correcta en términos de precios a los usuarios, ya sean industria u hogares.

#### 4. Conclusiones y discusión

En el presente estudio se ha planteado una discusión metodológica acerca de la manera correcta de asignar las emisiones de carbono a nivel sectorial. A nuestro juicio la metodología MIP, al incorporar las interacciones sectoriales, refleja de manera mucho más adecuada el verdadero nivel de emisiones atribuible a cada sector.

La metodología aquí presentada, con una aplicación para el caso de la economía chilena, permite identificar de manera más certera los impactos de las diferentes industrias o sectores sobre el ecosistema. Una mirada completa al fenómeno debería incorporar también el efecto de los cambios en el ecosistema – como el cambio climático – sobre el sistema económico productivo, lo cual es un desafío para futuras investigaciones.

El estudio además plantea el problema de la definición de una eventual “base impositiva” en un mecanismo de impuestos al CO<sub>2</sub>. Tomando como dadas las elasticidades-precio de las demandas de inputs de los sectores productivos, a mayor CO<sub>2</sub> asignado, mayor será la carga impositiva ¿Cuál es entonces la manera de asignar correctamente las emisiones para cada sector? ¿Y para cada empresa? ¿Y para los individuos? La consecuencia lógica de este trabajo, es que no sólo se les debe cobrar por el tipo de energía que utilizan en sus procesos productivos o en el consumo, sino que también dichos usuarios o demandantes deben comprender que a través de su consumo de otros inputs “sucios” están contribuyendo a aumentar el nivel de emisiones. La metodología aquí desarrollada permite hacer explícita dicha información.

Por otro lado, y utilizando como base la metodología MIP, se ha realizado una descomposición de los determinantes de la evolución temporal de la Huella de Carbono, permitiendo identificar el Efecto Escala, el Efecto Composición y el Efecto Técnico y así realizar un análisis más detallado de los elementos subyacentes que determinan los cambios en este indicador. Se ha encontrado que el efecto predominante se asocia al efecto escala y en segundo lugar al efecto técnico. El efecto composición contribuye reduciendo el nivel de emisiones, y refleja el tránsito hacia una economía con mayor peso del sector servicios. Esto plantea desafíos para los hacedores de política ya que posiblemente el único determinante que puede ser modificado – al menos en el corto o mediano plazo – corresponde al efecto técnico y sus componentes.

Esto da cuenta también de la necesidad de tender hacia un sistema de “cuentas nacionales verdes” que permita mayor nivel de desagregaciones sectoriales y el uso de metodologías comparables internacionalmente. Este trabajo también se debe entender como un aporte en este sentido.

Se han expuesto además, las ventajas de utilizar los enfoques estructurales por sobre los estadísticos para analizar las relaciones entre nivel de emisiones y el grado de desarrollo de los países, medido a través del PIB per cápita. A pesar de sus limitaciones, el enfoque

estructural permite identificar de manera precisa a los determinantes que guían la evolución de las emisiones y permite comprender que el fenómeno no corresponde a una mera regularidad empírica. Por otro lado, los enfoques estadísticos aún adolecen de serios problemas metodológicos ya sea por la falta de un adecuado marco teórico que sea capaz de explicar el fenómeno o por que no se hacen cargo del problema de cointegración de las variables analizadas. Posiblemente una línea de investigación futura pase por integrar la teoría con los enfoques estructurales y estadísticos, utilizando métodos semi-estructurales que incluyan en las regresiones de la EKC información sobre la composición de la economía o sobre la tecnología utilizada.

## Referencias

- 1) Barnosky, A. D. et al (2011). "Has the Earth's sixth mass extinction already arrived?", *Nature* 471:51-57
- 2) Barnosky, A. D. et al (2012). "Approaching a state shift in Earth's biosphere?", *Nature* 486:52-58
- 3) Bruyn, de, S. (2000) "Economic Growth and the Environment: An Empirical Analysis", Springer Netherlands Pub.
- 4) Church, J.; White, N., (2011) "Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century", *Surveys in Geophysics* Vol. 32.
- 5) Coondoo, D.; Dinda, S. (2002) "Causality between income and emission: a country group-specific econometric analysis", *Ecological Economics* 40 (2002) 351-367
- 6) Cruz, Luis M.G (2009) "Application of IO Energy Analysis for CO2 Emissions by the Portuguese Economy: The Case of Portugal", *Handbook of Input-Output Economics in Industrial Ecology*, Chapter 25, Springer.
- 7) Consejo Minero (2015), "Reporte Anual", Chile.

- 8) Day, K.; Grafton, Q. (2003) "Growth and the Environment in Canada: An Empirical Analysis", *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue canadienne d'agroeconomie*, Volume 51, Issue 2 July 2003 Pages 197-216.
- 9) Dietzenbacher, E.; & Los, B.; (1998): Structural Decomposition Techniques: Sense and Sensitivity, *Economic Systems Research*, 10:4, 307-324
- 10) Farhani, S.; and Ben Rejeb, J.; (2012) "Energy Consumption, Economic Growth and CO2 Emissions: Evidence from Panel Data for MENA Region", *International Journal of Energy Economics and Policy (IJEEP)*, Vol. 2, No. 2, pp. 71-81, 2012.
- 11) Federal Statistical Office of Germany (2011) "Environmental Economic Accounting-Extended Input-Output Model for Energy and Greenhouse Gases" Final Report.
- 12) Frankfurt School of Finance and Management (2015) "Global trends in renewable energy investment 2015".
- 13) Fundación Heinrich Böll (2012) "Energy Transition: The German *Energiewende*" versión revisada 2015.
- 14) Galeotti, M., Manera, M. & Lanza, A. (2009) "On the Robustness of Robustness Checks of the Environmental Kuznets Curve Hypothesis", *Environ Resource Econ* (2009) 42: 551.
- 15) García, JM. (2016) "Impact of a carbon tax on the Chilean economy: A computable general equilibrium analysis", *Energy Economics* 57 (2016) 106–127.
- 16) Hoekstra, R.; van der Bergh, J. (2003) "Comparing structural and index decomposition analysis" *Energy Economics* 25 (2003) 39–64
- 17) IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 18) Karl, T.; Melillo, M; Peterson, T.; (2009) "Global Climate Change Impacts in the United States", Cambridge University Press, 2009.
- 19) Lenzen, M.; Murray, J.; Sack, F.; Wiedmann, T., (2007) "Shared Producer and Consumer Responsibility: Theory and Practice", *Ecological Economics* 61, (1), 27-42.
- 20) Levitus et al (2009) "Global ocean heat content 1955–2008 in light of recently revealed instrumentation problems", *Geophysical Research Letters*

- 21) Lopez, R. E.; & Anriquez, G.; & Gulati, S. (2007) "Structural change and sustainable development," *Journal of Environmental Economics and Management*, Elsevier, vol. 53(3), pages 307-322, May.
- 22) López, R.E (2010) "Sustainable economic development: on the coexistence of resource-dependent and resource-impacting industries," *Environment and Development Economics*, Cambridge University Press, vol. 15(06), pages 687-705, December.
- 23) López, R.E & Yoon, S. (2014) "Sustainable" Economic Growth: The Ominous Potency of Structural Change," *International Review of Environmental and Resource Economics*, now publishers, vol. 7(2), pages 179-203, July.
- 24) Mayer, H. y Flachmann, Christine (2011) "Extended Input-Output Model for Energy and Greenhouse Gases" Final Report, Federal Statistical Office of Germany.
- 25) Ministerio de Energía – Chile (2015) "Una mirada participativa del rol y los impactos de las energías renovables en la matriz eléctrica futura".
- 26) Minx, J.C et al (2012) "Input-Output Analysis and Carbon Footprinting: An Overview of Applications", *Economic Systems Research*, 21:3, 187-216.
- 27) Montero J.P et al. (2015) "Reforma tributaria: Un avance hacia una economía más baja en carbono", documento de trabajo de Centro UC Cambio Global.
- 28) Munksgaard, J. (2009) "Models for National CO2 Accounting", *Handbook of Input-Output Economics in Industrial Ecology*, Chapter 26, Springer.
- 29) OCDE (2016) Evaluaciones del Desempeño Ambiental: Chile 2016"
- 30) OCDE (2013) "Climate and carbon: Aligning prices and policies" OECD Environment Policy paper, October 2013 n°01.
- 31) Perese, K. (2010) "Input-Output model analysis: Pricing carbon dioxide emissions" Working Paper Series Congressional Budget Office Washington, D.C.
- 32) Perman, R; Stern, D. (2003) "Evidence from panel unit root and cointegration tests that the Environmental Kuznets Curve does not exist" *The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* , 47:3, pp. 325–347
- 33) POCH Ambiental. (2008). "Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero" del 2008. Estudio a solicitud de la CONAMA y el PNUD.
- 34) Schuschny, A. (2005) "Tópicos sobre el modelo Insumo-Producto: Teoría y aplicaciones" CEPAL, documento presentado en la Reunión de trabajo sobre Modelización, Matrices de Insumo-Producto y Armonización Fiscal.

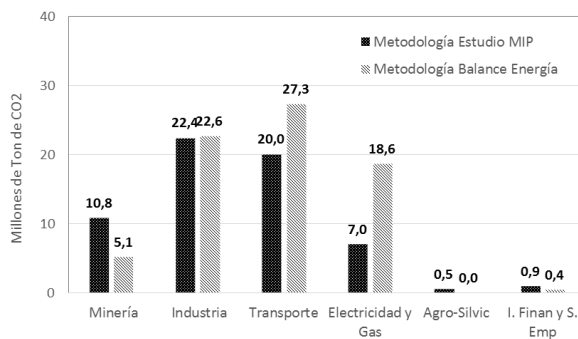
- 35) Seibel, S. (2003) "Decomposition analysis of carbon dioxide emission changes in Germany—conceptual framework and empirical results", European Commission Working Papers and Studies
- 36) Stern, D. (2004) "The Rise and Fall of the Environmental Kuznets Curve", *World Development*, Volume 32, Issue 8, August 2004, Pages 1419-1439.
- 37) Stern, D. (2014) "The Environmental Kuznets Curve: A Primer," CCEP Working Papers 1404, Centre for Climate Economics & Policy, Crawford School of Public Policy, The Australian National University.
- 38) The Mining Association of Canada (2016) "Principles for Climate Change Policy Design".
- 39) Weinzettel, J; Kovanda, J. (2009) "Assessing socioeconomic metabolism through hybrid life cycle assessment", *Journal of Industrial Ecology* 13 (4), 607-621
- 40) Weinzettel, J; Steen-Olsen, K; Hertwich, EG; Borucke, M; Galli, A. (2014) "Ecological footprint of nations: Comparison of process analysis, and standard and hybrid multiregional input–output analysis", *Ecological Economics* 101, 115-126
- 41) Wiedmann, T. and Minx, J. (2008). A Definition of 'Carbon Footprint'. In: C. C. Pertsova, *Ecological Economics Research Trends: Chapter 1*, pp. 1-11, Nova Science Publishers, Hauppauge NY, USA.
- 42) World Resources Institute (2015) "Delivering on the U.S Climate Commitment: A 10-point plan toward a low-carbon future" Working Paper.
- 43) World Bank (2015) "State and Trends of Carbon Pricing"
- 44) Zhang, Y. (2012) "Scale, Technique and Composition Effects in Trade-Related Carbon Emissions in China", *Environ Resource Econ* (2012) 51:371–389



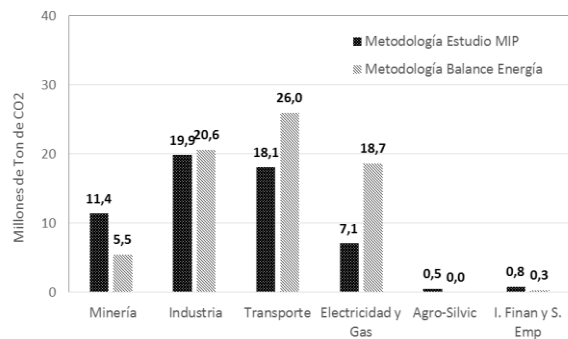
## Anexo 1

### Comparación de resultados entre metodología MIP y metodología BE (2008-2013)

2008

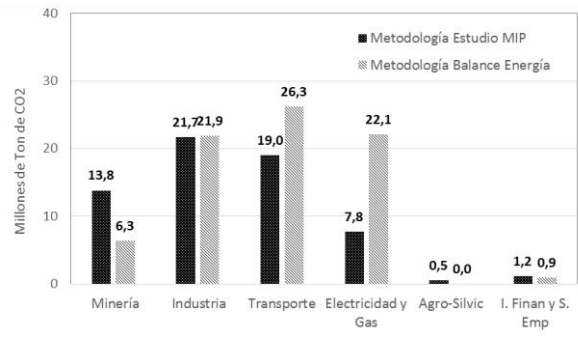
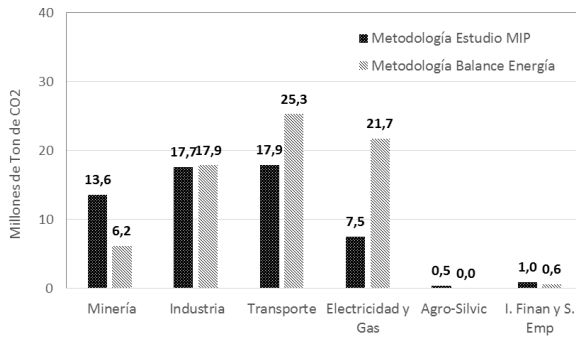


2009

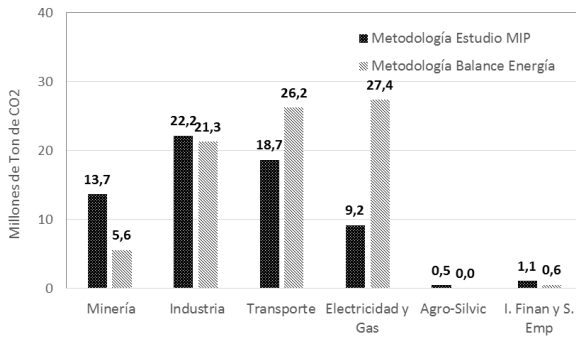


2010

2011



**2012**



**2013**

