

## Contribución de los subsectores manufactureros en la variación de las emisiones de CO<sub>2</sub> por el uso de combustible en San Luis Potosí, México

Contribution of manufacturing subsectors in the variation of CO<sub>2</sub> emissions from the use of fuel in San Luis Potosí, México

\*María Teresa Gutiérrez Escajeda<sup>1</sup>, Pedro Medellín-Milán<sup>2</sup>, Alfredo Ávila Galarza<sup>2</sup>,  
José Socorro Morales Aguilar<sup>1</sup> Manuel Armando Chavira Martínez<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Delicias. Paseo Tecnológico km. 3.5 s/n, Delicias, Chihuahua, México. C.P. 33000  
Correo electrónico: [teresa.gutierrez@itdelicias.edu.mx](mailto:teresa.gutierrez@itdelicias.edu.mx)

<sup>2</sup>Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Programas Multidisciplinarios de Posgrado en Ciencias Ambientales.

\*Autor de correspondencia

### Resumen

El análisis de la variación de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) proporciona información útil para las alternativas de reducción. En el presente estudio se realizó una descomposición de los factores que determinan la variación anual de las emisiones de CO<sub>2</sub>, identificando el efecto de cada uno de los subsectores manufactureros de San Luis Potosí, México, durante el periodo 2000-2012. Se utilizó el enfoque Índice Divisia de Media Logarítmica (LMDI, por sus siglas en inglés) para identificar la contribución desagregada de los subsectores manufactureros en la variación de las emisiones, de acuerdo con la ecuación de Kaya. La intensidad energética y el Producto Interno Bruto (PIB) manufacturero fueron los factores de mayor efecto en la variación del CO<sub>2</sub>, con contribuciones del 53.85% y 37.32% respectivamente. Los subsectores de la fabricación de productos a base de minerales no metálicos, la industria metálica básica y la alimentaria son los que inciden principalmente sobre la dinámica de los factores identificados.

**Palabras clave:** Factores determinantes; emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>); intensidad energética; identidad de Kaya; Producto Interno Bruto (PIB) manufacturero.

### Abstract

The analysis of the variation of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) provides useful information for reduction alternatives. In the present study, a decomposition of the factors that determine the annual variation of CO<sub>2</sub> emissions was performed, identifying the effect of each of the manufacturing subsectors of San Luis Potosí, Mexico, during the period 2000-2012. The Log Mean Divisia Index (LMDI) approach was used to identify the disaggregated contribution of manufacturing subsectors in the variation of emissions, according to the Kaya equation. Energy intensity and the manufacturing Gross Domestic Product (GDP) were the factors with a greater effect on the variation of CO<sub>2</sub>, with contributions of 53.85% and 37.32% respectively. The subsectors of manufacturing products based on non-metallic minerals, primary metals industry, and food industry are mainly affecting the dynamics of the factors identified.

**Keywords:** Factors driving; carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions; energy intensity; Kaya identity; manufacturing Gross Domestic Product (GDP).

Recibido: 7 de mayo de 2017

Aceptado: 13 de septiembre de 2018

Publicado: 11 de abril de 2019

**Como citar:** Gutiérrez-Escajeda, M. T., Medellín-Milán, P., Ávila Galarza, A., Morales-Aguilar, J. S., & Chavira Martínez, M.A. (2019). Contribución de los subsectores manufactureros en la variación de las emisiones de CO<sub>2</sub> por el uso de combustible en San Luis Potosí, México. *Acta Universitaria* 29, e1920. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2019.1920>

## Introducción

La concentración media global de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) se ha incrementado en un 40% desde la era preindustrial debido, en primer lugar, a las emisiones derivadas de las actividades humanas tales como la generación de electricidad, los procesos industriales y el transporte, cuyo componente común es el uso de combustibles fósiles; y en segundo lugar por el cambio de uso del suelo. Esta condición ha intensificado el impacto del efecto invernadero en el calentamiento global que se ha experimentado en los últimos años (*Intergovernmental Panel on Climate Change* [IPCC], 2013). Por lo anterior, cada vez son más numerosos los estudios que analizan y describen los factores determinantes de la relación causal entre las emisiones de CO<sub>2</sub> y la dinámica del uso de los combustibles fósiles (Akpan & Akpan, 2012; Campo & Olivares, 2013; Feng, Davis, Sun & Hubacek, 2015).

En diferentes regiones del mundo se han llevado a cabo estudios en los que se relacionan las emisiones de CO<sub>2</sub> con la dinámica del crecimiento económico (Alcántara & Padilla, 2005; Tapia, Lonides & Carpintero, 2012; Zhang, Mu & Ning, 2009). A un nivel más desagregado, los estudios también incluyen el análisis causal del CO<sub>2</sub> generado por el uso de combustibles fósiles, distinguiendo entre los efectos de las actividades económicas que prevalecen en determinada región (Marrero & Ramos-Real, 2013; Samaniego & Galindo, 2009; Yue, Long, Chen & Zhao, 2013). En casos aún más específicos, se incluyen estudios detallados sobre los factores motrices del CO<sub>2</sub> emitido por un sector industrial en particular (Chen, Yang & Chen, 2013; Hamit-Haggar, 2012; Lee & Lin, 2001). Independientemente de la escala espacial, el análisis de los factores que determinan las emisiones de CO<sub>2</sub> es una tarea que debe llevarse a cabo para asegurarse que la implementación de cualquier iniciativa de reducción contribuya de forma precisa y eficaz.

Uno de los modelos que frecuentemente se utiliza para explicar las emisiones de CO<sub>2</sub> por el uso de combustibles fósiles en fuentes cuyos procesos dependen del uso de energía es la identidad de Kaya (Kaya, 1990, citado en IPCC, 2007; Yamaji, Matsushashi, Nagata & Kaya, 1991). De acuerdo con esta ecuación, las emisiones nacionales de CO<sub>2</sub> se explican por el producto de cuatro factores determinantes básicos: índice de carbonización o intensidad de carbonización de la energía, intensidad energética, la renta económica en términos del Producto Interno Bruto (PIB) per cápita y la población. La identidad de Kaya se ha aplicado en su base original para analizar los factores determinantes que impulsan las emisiones de CO<sub>2</sub> (Alcántara & Padilla, 2005; Wang *et al.*, 2014). También se ha usado con algunas variantes en sus factores para explorar asuntos relacionados con las desigualdades en las emisiones de CO<sub>2</sub> de cada país (O'Mahony, 2013) o para analizar el impacto de acciones de reducción previamente aplicadas (Agnolucci *et al.*, 2009; Duro & Padilla, 2006).

Para entender la dinámica de las emisiones de CO<sub>2</sub>, es necesario evaluar los cambios temporales de los indicadores económicos, medioambientales o sociales que impactan en los factores determinantes de la variación de las mismas. Para esto, existen diversas técnicas como el análisis de descomposición de índices (IDA, por sus siglas en inglés), cuyo objetivo es la descomposición de la variación experimentada por un indicador. Como parte de los IDA, se encuentran los métodos basados en Índices tipo Divisia, que consisten en la suma ponderada de las tasas de crecimiento de un indicador, donde las ponderaciones se corresponden con las contribuciones de los distintos componentes en el valor total, para cada periodo bajo estudio; y los Índices Laspeyres que, a diferencia de los Divisia, mantienen una ponderación fija, correspondiente con la del período inicial (Fernández, 2012). Ambos se han utilizado con frecuencia para analizar indicadores relacionados con la demanda de energía y, en años más recientes, con las emisiones de CO<sub>2</sub> (Alves & Moutinho, 2013; Diakoulaki & Mandaraka, 2007; Sahu & Narayanan, 2010; Szép, 2013).

Otra técnica es el análisis de descomposición estructural (SDA, por sus siglas en inglés) que, basado en el modelo Input-Output (I-O) de un sistema o sector en estudio, ofrece la ventaja de proporcionar los efectos directos e indirectos sobre los cambios de la producción del sector, analizando el efecto de los cambios en la demanda final del mismo (Boqiang & Liu, 2017). Butnar & Llop (2011) utilizaron el SDA para analizar el efecto del sector de servicios en las emisiones de carbono en España, concluyendo que los efectos descompuestos mostraron una disminución en las emisiones de CO<sub>2</sub> debido a los cambios tecnológicos entre 2000 y 2005, pero el efecto final resultó en un aumento en las emisiones causadas por el incremento en la demanda final de los servicios. Por su parte, Xiao, Niu & Guo (2016) exploraron los principales impulsores de las emisiones de CO<sub>2</sub> en China, entre sus conclusiones se destaca que, dentro de los efectos de los Outputs, los efectos del consumo urbano, la inversión y la expansión de las exportaciones contribuyeron significativamente en las emisiones de CO<sub>2</sub>. En comparación con otros métodos, el SDA proporciona una explicación más exhaustiva de los factores determinantes de las emisiones, pero el nivel de detalle de los datos es más alto que el de los otros métodos.

Ang & Choi (1997) aportaron el método de índice Divisia refinado, llamado posteriormente índice Divisia de Media Logarítmica (LMDI, por sus siglas en inglés), que proporciona una descomposición exacta de la contribución de los factores al introducir una nueva función de ponderación de tipo media logarítmica. El LMDI se ha utilizado en los últimos años para analizar los cambios desagregados en las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas en distintos ámbitos o sectores económicos (Dai, Zhu & Song, 2015; Lee & Oh, 2006; Liu, Fang, Wu & Wei, 2007).

A escala puntual, el LMDI se ha utilizado de forma extensiva para descomponer la contribución del sector industrial sobre la variación del CO<sub>2</sub> generado por el uso de energía. Liu *et al.* (2007) analizaron los cambios de las emisiones producidas por 36 sectores industriales en China, concluyendo que los correspondientes a las materias primas químicas y productos químicos, productos minerales no metálicos y la fundición y prensado de metales ferrosos explican el 59.31% de la variación de las emisiones. Por otro lado, Zhao *et al.* (2010) aplicaron también el LMDI y encontraron que el PIB del sector industrial es el factor determinante de mayor efecto en la variación interanual del CO<sub>2</sub> generado en dicho sector; además, concluyeron que la disminución del uso de energía por unidad de PIB, el ajuste de la matriz energética que hace referencia a la variedad de los tipos de combustibles utilizados y el cambio de la estructura industrial hacia sectores de menor demanda energética son factores determinantes para la reducción de las emisiones.

Antes de orientar y proponer estrategias de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, se deben tomar en cuenta las características particulares de la dinámica económica de cada región o país de interés y detectar los factores que impulsan los cambios temporales en las emisiones. Por esto, el objetivo del presente estudio es llevar a cabo la descomposición de los efectos de los factores determinantes propuestos en la identidad de Kaya, para analizar la contribución de cada uno de los subsectores de la industria manufacturera de San Luis Potosí que contribuyen en la variación del CO<sub>2</sub> generado por el consumo de combustibles durante el periodo 2000-2012. Además, con base en lo anterior, identificar las ramas productivas hacia las que deben plantearse las posibles estrategias de mitigación.

El crecimiento económico que ha experimentado el sector manufacturero de San Luis Potosí en los últimos años se ha reflejado a nivel nacional en el periodo 2003-2012. Esta fue la segunda entidad federativa de mayor crecimiento en el PIB del sector manufacturero, con una tasa anual de variación promedio del 4.45%, solo por debajo del estado de Nuevo León que alcanzó una tasa del 4.62% (Gutiérrez, 2015). A nivel interno, el sector industrial manufacturero de San Luis Potosí es el principal contribuyente del PIB estatal, con una participación de al menos el 24% anual en los últimos veinte años, con un mayor crecimiento en la última década (figura 1). A su vez, de los subsectores que lo

componen, los más importantes por su contribución al PIB son: fabricación de maquinaria y equipo, industria alimentaria, industrias metálicas básicas, y productos minerales no metálicos; que de manera conjunta contribuyen con el 90% del PIB manufacturero estatal (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2006, 2010, 2012).

La tendencia creciente de la participación del PIB manufacturero de San Luis Potosí se ha reflejado también en algunos indicadores ambientales. Las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de este sector durante el periodo 2000-2006 fueron de las más contribuyentes a nivel estatal al alcanzar 39 985 755 t, dentro de las cuales el 68% corresponden a las generadas por el uso de combustibles y el 32% restante a las emisiones no energéticas en los procesos industriales (Gutiérrez, Medellín & Abrego, 2016). En gran medida, tales emisiones se generan por el uso de coque de petróleo, combustóleo, gas LP y gas natural, que son los principales combustibles que componen la matriz energética del sector en cuestión.

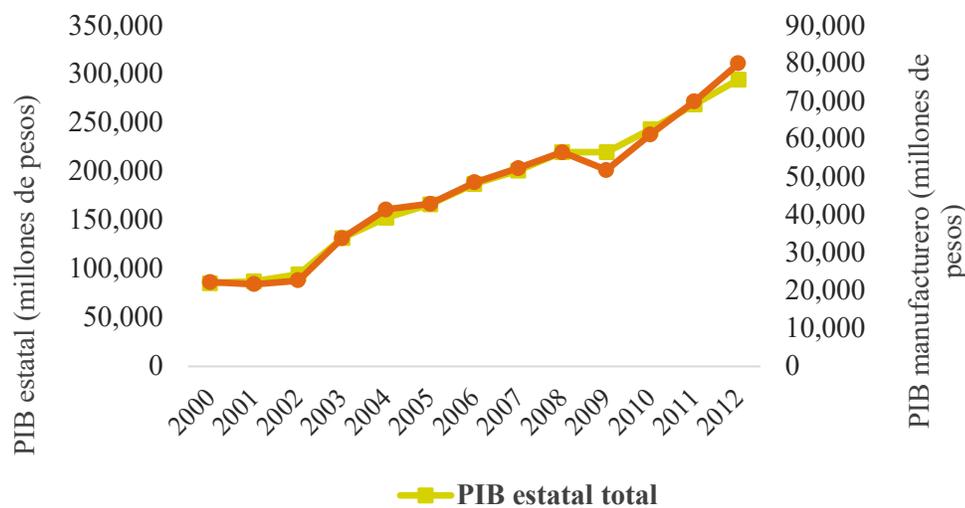


Figura 1. Comparación de la dinámica del PIB estatal y del PIB del sector manufacturero de San Luis Potosí.  
Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI 2006, 2010, 2012.

## Materiales y Métodos

El método LMDI se aplicó para desagregar y analizar los efectos de los factores determinantes de Kaya, logrando con esto identificar los subsectores manufactureros de mayor contribución en la variación interanual de las emisiones de CO<sub>2</sub>. De acuerdo con la identidad de Kaya, las emisiones se pueden descomponer en cuatro factores:

$$CO_2 = \frac{CO_2}{E} \cdot \frac{E}{PIB} \cdot \frac{PIB}{P} \cdot P \quad (1)$$

Donde  $CO_2/E$  es el índice de carbonización, que son las emisiones de CO<sub>2</sub> en función de la energía (E) utilizada para cubrir la demanda, por lo que también es llamada intensidad de carbonización de la energía. El factor  $E/PIB$  representa la intensidad energética en función de la renta económica; esto es, la cantidad de energía requerida para producir una unidad del PIB. El factor  $PIB/P$  indica la renta económica *per cápita* y P es la población (Kaya, 1990, citado en IPCC, 2007).

Gutiérrez *et al.* (2016) aplicaron previamente esta identidad en el mismo contexto del presente estudio, concluyendo que el efecto del factor de la población sobre la variación de las emisiones del sector manufacturero resultó poco significativo. El PIB manufacturero de San Luis Potosí se compone, en gran medida de empresas que distribuyen sus productos en gran parte del territorio nacional y en el extranjero; por lo tanto, la demanda de este sector queda exenta de ser exclusiva de la población de San Luis Potosí; de tal forma que el factor de la población en el modelo no reflejó un efecto significativo en las emisiones de CO<sub>2</sub> del sector objeto de estudio. Por lo tanto, la relación se utilizó prescindiendo de este factor, por lo que la ecuación se aplicó como:

$$CO_2 = \frac{CO_2}{E} \cdot \frac{E}{PIB} \cdot PIB \quad (2)$$

Para el estudio, las emisiones anuales de CO<sub>2</sub> se tomaron en toneladas (tCO<sub>2</sub>), la energía consumida por el uso de combustibles en barriles equivalentes de petróleo (BEP), y el PIB manufacturero corresponde a miles de pesos a precios del 2008.

La identidad (2) se puede reescribir como:

$$C = c \cdot e \cdot r \quad (3)$$

Donde: C= emisiones de CO<sub>2</sub>, c= intensidad de carbonización de la energía, e= intensidad energética, r= PIB.

La ecuación (3) implica que las emisiones de CO<sub>2</sub> del sector manufacturero están vinculadas con la intensidad de carbonización de la energía, la intensidad energética y con el PIB del mismo sector. Puesto que la finalidad es analizar el efecto sectorizado de estos factores, la descomposición se aplicó para los distintos subsectores, por lo que la expresión (3) queda:

$$C = \sum_i^n C_i = \sum_i^n c_i e_i r_i \quad (4)$$

Donde *i* corresponde a cada uno de los subsectores que integran el sector manufacturero: 1, industria alimentaria; 2, industria del papel, impresión e industrias conexas; 3, industria química, del plástico y hule; 4, fabricación de productos a base de minerales no metálicos; 5, industria metálica básica y productos metálicos; y 6, fabricación de maquinaria y equipo.

Como el interés se centra en la tasa de cambio de las emisiones en un periodo dado, se considera la derivación de los logaritmos de la expresión (4):

$$\frac{d \ln C}{dt} = \sum_i^n \left( \frac{d \ln c_i}{dt} + \frac{d \ln e_i}{dt} + \frac{d \ln r_i}{dt} \right) \quad (5)$$

Al integrar la expresión (5), y siguiendo con la propuesta de la media logarítmica (*w<sub>i</sub>*) del enfoque LMDI de Ang & Choi (1997), la forma aditiva para descomponer los efectos de cada factor en la variación interanual total de las emisiones de CO<sub>2</sub> ( $\Delta C_T$ ) para un intervalo entre un año base 0 y un año objetivo *T* (en este estudio corresponde a un año) está dada por:

$$\Delta C_T = \sum_i^n w_i \ln \frac{c_i^T}{c_i^0} + \sum_i^n w_i \ln \frac{e_i^T}{e_i^0} + \sum_i^n w_i \ln \frac{r_i^T}{r_i^0} \quad (6)$$

Donde:

$$w_i = \frac{C_i^T - C_i^0}{\ln C_i^T - \ln C_i^0} \quad (7)$$

Es la media logarítmica de  $C_T$  y  $C_0$ , que asegura una descomposición aditiva exacta al ponderar la contribución de cada subsector en cada uno de los factores determinantes de la variación de las emisiones en un periodo de tiempo dado (Ang, 2005).

La expresión (6) determina las emisiones con las cuales contribuye cada factor en el total de la variación interanual de las mismas; de forma desagregada se tiene:

$$\Delta C_c = \sum_i^n \frac{C_i^T - C_i^0}{\ln C_i^T - \ln C_i^0} \ln \frac{c_i^T}{c_i^0} \quad (8)$$

$$\Delta C_e = \sum_i^n \frac{C_i^T - C_i^0}{\ln C_i^T - \ln C_i^0} \ln \frac{e_i^T}{e_i^0} \quad (9)$$

$$\Delta C_r = \sum_i^n \frac{C_i^T - C_i^0}{\ln C_i^T - \ln C_i^0} \ln \frac{r_i^T}{r_i^0} \quad (10)$$

Donde  $\Delta C_c$ ,  $\Delta C_e$  y  $\Delta C_r$  corresponden a los efectos de: la intensidad de carbonización de la energía, la intensidad energética y el PIB respectivamente. Es decir, son las emisiones con las cuales contribuye la variación sectorizada de cada uno de estos factores sobre la variación total de las mismas en un periodo dado.

Considerando lo anterior, se puede establecer que el cambio en las emisiones de CO<sub>2</sub> en un periodo  $T$  ( $\Delta C_T$ ) se explica por el efecto de la variación de la intensidad de carbonización ( $\Delta C_c$ ), el de la intensidad energética ( $\Delta C_e$ ) y del PIB ( $\Delta C_r$ ). Por lo tanto, la variación de las emisiones de un año base (0) a un año objetivo ( $T$ ), puede expresarse como:

$$\Delta C_T = C_T - C_0 = \Delta C_c + \Delta C_e + \Delta C_r \quad (11)$$

Los datos relativos a las emisiones de CO<sub>2</sub> y los valores necesarios para cada uno de los factores de Kaya se tomaron del inventario de GEI del sector industrial en San Luis Potosí, elaborado por Gutiérrez (2015). Los cálculos de la ecuación (6) se llevaron a cabo en una hoja electrónica.

## Resultados

En términos generales, la dinámica de la variación interanual de las emisiones mostró un comportamiento cambiante, libre de tendencia, a excepción del periodo 2000-2005 en el que se mantuvo un crecimiento anual (tabla 1). La contribución (efecto) de cada factor en la variación total interanual de las emisiones de CO<sub>2</sub>, tanto en valores absolutos de emisiones como en valores porcentuales, se describe y analiza a continuación.

El efecto del factor de la intensidad energética ( $\Delta C_e$ ) predominó sobre los demás; de hecho, fue el único que mantuvo una contribución porcentual positiva durante todo el periodo evaluado, lo que significa que su índice de cambio se mantuvo en el mismo sentido de la variación total de las emisiones; en promedio, su participación anual fue del 53.85%. Por su parte, el efecto del PIB ( $\Delta C_r$ ) fue el segundo

contribuyente con un 37.32%, aunque presentó periodos en los que su dinámica estuvo desacoplada con respecto al total, como el periodo 2000-2001 en el cual la variación total de las emisiones mostraron un incremento de 20 241 tCO<sub>2</sub>, mientras que la contribución del PIB en esta variación fue una disminución de 230 602 t CO<sub>2</sub>; y en los periodos 2005-2008 y 2011-2012 el efecto fue contrario. Finalmente, el efecto del índice de carbonización ( $\Delta C_c$ ) contribuyó con el 8.83% de la variación total de las emisiones y solo resultó significativo en el 2001-2002. A continuación, se analiza el efecto sectorizado de cada uno de los factores determinantes.

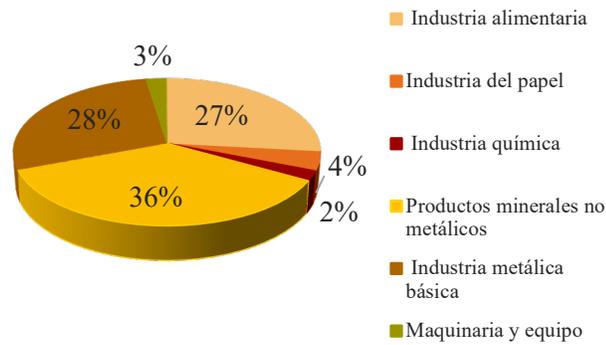
**Tabla 1.** Contribución de los factores determinantes en la variación anual de las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por el uso de combustible en el sector manufacturero de San Luis Potosí, durante el periodo 2000-2012.

Periodo	Variación total CO <sub>2</sub>		Contribución de cada factor en la variación anual de las emisiones (en toneladas de CO <sub>2</sub> y porcentual)				
	$\Delta C$	$\Delta C_c$	%	$\Delta C_e$	%	$\Delta C_r$	%
2000-2001	20 241	-6 059	-1.23	256 903	52.05	-230 602	-46.72
2001-2002	188 046	79 482	42.27	91 746	48.79	16 818	8.94
2002-2003	208 228	-4 357	-2.01	95 481	44.01	117 104	53.98
2003-2004	295 536	-6 531	-2.12	23 340	7.56	278 727	90.32
2004-2005	574 128	86 066	14.99	349 480	60.87	138 582	24.14
2005-2006	-62 872	-5 048	0.66	-409 133	53.45	351 310	-45.89
2006-2007	-294 829	-63 877	10.38	-391 299	63.57	160 347	-26.05
2007-2008	521 657	71 987	10.46	532 792	77.45	-83 122	-12.08
2008-2009	-1 047 750	-28 448	2.72	-556 273	53.09	-463 029	44.19
2009-2010	381 975	-92 171	-16.28	330 137	58.30	144 008	25.43
2010-2011	991 534	-12 956	-1.27	709 980	69.78	294 509	28.95
2011-2012	-248 250	-20 853	1.48	-807 464	57.33	580 068	-41.19

Los valores negativos en la columna  $\Delta C$  implican una disminución de las emisiones en dicho periodo. Los valores negativos en las columnas  $\Delta C_c$ ,  $\Delta C_e$  o  $\Delta C_r$  indican la cantidad de emisiones que dejaron de liberarse (emisiones "evitadas") en ese periodo por el efecto del factor implicado, según sea la columna. Los valores negativos en la contribución porcentual de cada factor indican que su contribución absoluta (en tCO<sub>2</sub>) fue en el sentido contrario respecto a la variación total de ese periodo ( $\Delta C$ ).

Fuente: Elaboración propia.

El factor de la intensidad energética, que resultó ser el principal contribuyente en la variación de las emisiones, presentó interanualidades en las que su efecto dominó por completo, como en el periodo 2004-2005 y 2007-2008, con contribuciones del 60.87% y 77.45% respectivamente. A nivel desagregado, la contribución de los subsectores manufactureros sobre el efecto interanual de la intensidad energética ( $\Delta C_e$ ) presentó un comportamiento anual cambiante. Con relación al efecto medio anual entre 2000-2012, se observa la contribución importante de tres grupos: productos minerales no metálicos, industria metálica básica y la alimentaria (figura 2).



**Figura 2.** Relevancia porcentual de los subsectores manufactureros en el efecto total de la intensidad energética sobre las emisiones de CO<sub>2</sub>.  
Fuente: Elaboración propia.

Dentro del periodo en estudio, la contribución del subsector de productos minerales no metálicos dominó en varias interanualidades con respecto al efecto de la intensidad energética ( $\Delta C_e$ ) en las emisiones, como en el 2004-2005, 2006-2007, 2007-2008, entre otros. En los periodos 2006-2007 y 2009-2010 su impacto fue positivo, en el sentido de que redujo la intensidad en el uso de energía, por lo que su efecto se reflejó en emisiones "evitadas", con contribuciones de -377 380 tCO<sub>2</sub> y -454 409 tCO<sub>2</sub>, que corresponde con el 76.40% y 64.64% respectivamente (tabla 2). Sin embargo, también mostró episodios en los que contribuyó con al menos el 40% del incremento del efecto de la intensidad energética, como en el 2007-2008 y 2010-2011, generando con esto un aumento en las emisiones.

**Tabla 2.** Contribución sectorizada del efecto de la intensidad energética en la variación de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Periodo	Efecto total de la intensidad energética (tCO <sub>2</sub> )	Contribución sectorizada del efecto de la intensidad energética (tCO <sub>2</sub> )*					
		Industria alimentaria	Industria del papel	Industria química	Productos minerales no metálicos	Industria metálica básica	Maquinaria y equipo
2000-2001	256 903	27 156	-11 943	-524	-12 393	253 485	1 122
2001-2002	91 746	-4 316	1 637	-10 521	-51 696	154 978	1 665
2002-2003	95 481	150 010	14 065	-2 381	57 860	-123 482	-591
2003-2004	23 340	-109 355	14 423	16 922	70 017	23 760	7 572
2004-2005	349 480	231 839	-13 631	-16 314	292 147	-165 560	20 999
2005-2006	-409 133	-245 609	-16 980	1 845	-86 813	-79 006	17 429
2006-2007	-391 299	-43 658	41 729	-4 470	-377 380	-17 115	9 595
2007-2008	532 792	124 066	14 723	23 089	326 828	135 053	-90 967
2008-2009	-556 273	-161 365	6 585	-13 869	-454 409	57 718	9 068
2009-2010	330 137	-228 288	-109 290	21 201	333 541	320 414	-7 442
2010-2011	709 980	224 699	16 702	-14 701	487 879	1 749	-6 348
2011-2012	-807 464	-319 301	59 543	-5 496	-160 097	-388 655	6 542

\*Toneladas de Dióxido de Carbono

Los valores negativos en el efecto total de la intensidad energética indican la cantidad de emisiones que dejaron de liberarse (emisiones "evitadas"), por la contribución de este factor sobre el total de la variación de las emisiones. Los valores negativos en las columnas de los subsectores indican la cantidad de emisiones que dejaron de liberarse (emisiones "evitadas") en ese periodo por el efecto del subsector implicado, según sea la columna.

Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, la industria metálica básica presentó también una participación significativa del 28% del efecto total que generó la intensidad energética en el cambio de las emisiones. Este subsector predominó en las primeras dos interanualidades, con una participación que derivó en el incremento de las emisiones (tabla 2). Finalmente, la industria alimentaria mostró aportaciones positivas relevantes en emisiones "evitadas", lo que ayudó a reducir la variación de las emisiones, como en el 2005-2006 que contribuyó con 245 609 tCO<sub>2</sub>; pero al igual que los subsectores anteriores, presentó participaciones importantes en el incremento de las emisiones como en el 2002-2003 y 2004-2005.

Para ofrecer un panorama sobre la participación específica dentro de cada uno de los subsectores de mayor contribución en el efecto de la intensidad energética ( $\Delta C_e$ ), es importante considerar lo siguiente. El subsector de productos minerales no metálicos está compuesto por las ramas de producción de cemento, cal, yeso, vidrio y productos cerámicos; y su consumo de energía se distribuye en un 55%, 13%, 18% y 14% respectivamente. Por su parte, dentro de la industria alimentaria, la participación en la demanda de energía de las distintas ramas es como sigue: elaboración de alimentos para animales con un 2%; molienda de granos y de semillas y obtención de aceites y grasas, el 1%; elaboración de azúcares, chocolates, dulces y similares con el 92%; la conservación de frutas, verduras y alimentos preparados con un 2%; y el 3% en la elaboración de productos de panadería y tortillas. Finalmente, para efectos del presente estudio, la industria metálica básica solo se compone de las ramas dedicadas a la producción de hierro y acero y la fabricación de productos de hierro y acero de material comprado.

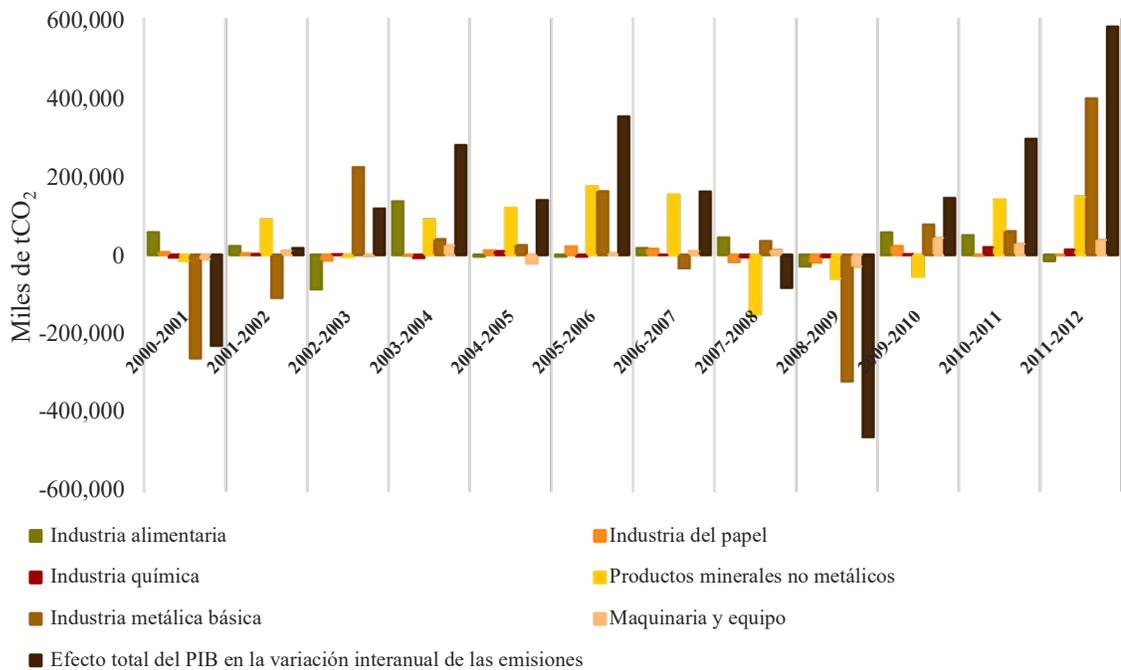
Por su parte, el factor determinante del PIB manufacturero ( $\Delta C_r$ ) presentó de forma desagregada una dinámica en la que predominó la participación de tres subsectores manufactureros (tabla 3). En promedio, la contribución desagregada con relación al efecto que presentó el PIB en la variación de las emisiones fue de un 39.16% por parte de la industria metálica básica, un 34.64% de los productos minerales no metálicos y un 14.27% en la industria alimentaria.

Es importante analizar los periodos en los que el PIB presentó una contribución importante en la variación de las emisiones. De la tabla 1, se observó que este factor participó de forma significativa con el 46.72%, 53.98%, 90.32% y el 45.89% durante las interanualidades 2000-2001, 2002-2002, 2003-2004 y 2005-2006, respectivamente. Ahora, de la descomposición sectorizada (figura 3) que resultó de la ecuación (10), se observó que la industria metálica básica fue el subsector de mayor contribución en el efecto que presentó el PIB durante el 2000-2001 y 2002-2003. En la interanualidad 2003-2004 predominó el efecto de la industria alimentaria y en el 2005-2006 los productos minerales no metálicos y la metálica básica fueron los de mayor efecto. Sin embargo, de acuerdo con estimaciones realizadas a partir de los datos de INEGI, el subsector de mayor contribución en el PIB manufacturero de San Luis Potosí, con un 34%, es el de fabricación de maquinaria y equipo, seguido por la industria alimentaria y la metálica básica con el 23% y 20% respectivamente (INEGI, 2006, 2010, 2012).

**Tabla 3.** Contribución sectorizada del efecto del factor determinante del PIB en la variación de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Periodo	Contribución total del PIB (tCO <sub>2</sub> )	Contribución sectorizada del efecto del PIB en la variación de las emisiones (tCO <sub>2</sub> )					
		Industria alimentaria	Industria del papel	Industria química	Productos minerales no metálicos	Industria metálica básica	Maquinaria y equipo
2000-2001	-230 602	56 806	6 232	-5 996	-14 690	-262 368	-10 585
2001-2002	16 818	21 493	3 063	1 654	89 239	-108 991	10 360
2002-2003	117 104	-86 878	-13 286	1 182	-4 463	222 295	-1 746
2003-2004	278 727	135 593	-1 514	-7 316	89 503	39 015	23 446
2004-2005	138 582	-3 522	10 556	9 108	119 168	24 123	-20 850
2005-2006	351 310	-3 486	20 507	-3 706	173 699	161 427	2 869
2006-2007	160 347	16 650	14 811	-132	153 188	-33 242	9 072
2007-2008	-83 122	43 420	-16 808	-5 453	-150 543	34 678	11 583
2008-2009	-463 029	-28 618	-18 782	-5 050	-60 055	-321 476	-29 048
2009-2010	144 008	56 273	22 054	1 343	-54 978	76 277	43 040
2010-2011	294 509	49 132	-1 330	18 906	140 389	59 552	27 858
2011-2012	580 068	-15 172	-322	12 893	147 783	397 385	37 500

Los valores negativos en el efecto total del PIB indican la cantidad de emisiones que dejaron de liberarse (emisiones “evitadas”), por la contribución de este factor sobre el total de la variación de las emisiones. Los valores negativos en las columnas de los subsectores indican la cantidad de emisiones que dejaron de liberarse (emisiones “evitadas”) en ese periodo, por el efecto de dicho subsector en el factor del PIB.  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3.** Participación sectorizada del efecto del factor determinante del PIB en la variación de las emisiones de CO<sub>2</sub>.  
Fuente: Elaboración propia.

## Discusión

La práctica común es relacionar las emisiones de CO<sub>2</sub> con la dinámica de la actividad económica prevaleciente en cualquier región, específicamente con la tendencia del PIB. Wang *et al.* (2014) concluyeron que, en la provincia China de Shandong, el factor de mayor contribución en la variación de las emisiones industriales de CO<sub>2</sub> es el PIB; lo que resulta congruente dado que la actividad industrial en esta región está perfilada hacia el uso intensivo de carbón, que es el combustible fósil con mayor factor de emisión de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, en el caso que ocupa en el presente estudio, el factor determinante de mayor contribución fue la intensidad energética, debido a que la estructura industrial de San Luis Potosí es variada y, como consecuencia, también los combustibles utilizados en el sector.

De forma específica, la descomposición sectorizada del efecto del factor del PIB ( $\Delta C_r$ ) permitió concluir que, a pesar de que el subsector de maquinaria y equipo fue el más contribuyente en el PIB manufacturero durante el periodo evaluado, su efecto en las emisiones no resultó relevante, dado que no es intensivo en el uso de combustibles fósiles; y que, aunque el subsector de productos minerales no metálicos apenas contribuyó con el 11% del PIB manufacturero, su efecto en la variación de las emisiones alcanzó un promedio del 34.64%. De lo anterior, se puede concluir que el impacto del factor del PIB en la variación de las emisiones directas de CO<sub>2</sub> será el de mayor efecto, siempre y cuando la estructura industrial dominante se profile hacia sectores intensivos en energía.

Si bien es cierto que la intensidad energética conlleva la relación de CO<sub>2</sub> por generación de unidades del PIB, la variación de las emisiones explicada por este factor tiene más relación con el consumo directo de combustibles de alta carbonización de los sectores energo-intensivos, como fue el caso del subsector de productos minerales no metálicos. La fluctuación de la producción de este subsector fue capaz de explicar la variación del efecto total de la intensidad energética, tanto en episodios de incremento de CO<sub>2</sub>, como de emisiones evitadas. De la misma forma, Liu *et al.* (2007) comprobaron que, de los 36 sectores industriales analizados en China, los correspondientes a las materias primas químicas y productos químicos, productos minerales no metálicos, y la fundición y prensado de metales ferrosos, los cuales son sectores energo-intensivos, explican el 59.31% de la variación de las emisiones.

La descomposición de la contribución en la variación de CO<sub>2</sub> intra e inter subsectores industriales permitió detectar de forma específica los giros industriales sobre los que el gobierno debe enfocar sus esfuerzos para promover políticas de reducción de emisiones. Además, considerando los factores determinantes derivados de la descomposición de la ecuación de Kaya, las alternativas de mitigación deben dirigirse hacia mejoras en la eficiencia energética para un uso más eficiente de sus combustibles, así como el cambio hacia combustibles de menor carbonización para los subsectores energo-intensivos, independientemente de su contribución en el PIB.

## Conclusiones

La descomposición sectorial que se logró con la aplicación del LMDI permitió observar que el efecto temporal de los factores determinantes en la variación de las emisiones de CO<sub>2</sub> del sector manufacturero de San Luis Potosí no sigue una tendencia sostenida. Cada uno de los tres factores que se analizaron, de acuerdo a la identidad de Kaya, presentaron periodos en los que su contribución derivó en el incremento de las emisiones y otros en los que su impacto resultó en una disminución. Por otra parte, considerando el promedio del efecto porcentual de cada factor en la variación de las emisiones durante el periodo de estudio 2000-2012, la intensidad energética fue el de mayor contribución con un 53.85%, el PIB con el 37.32% y la intensidad de carbonización con el 8.83%.

Con relación al factor de la intensidad energética, los tres subsectores de mayor impacto en el efecto de este componente fueron los de productos minerales no metálicos, la industria metálica básica y la alimentaria. Cada uno de estos grupos presentó episodios en los que su efecto impactó en el incremento de las emisiones, pero también en la disminución de las mismas; esto lleva a suponer que aún no se han implementado estrategias de mitigación de emisiones que impacten en la intensidad energética y que permitan una reducción de emisiones sostenida.

Por su parte, el efecto del factor del PIB ( $\Delta C_p$ ) también impactó en la variación de las emisiones; aunque, al igual que el factor anterior, su contribución no presentó una tendencia sostenida. Sin embargo, cabe señalar que los únicos periodos en los que este componente contribuyó en la reducción de las emisiones fueron aquellos en los que se presentaron episodios de crisis económicas, como el 2000-2001 (Mejía-Reyes & Mejía-Reyes, 2007) y 2008-2009 (Huesca & Calderón, 2015).

Del análisis desagregado, se concluye que las estrategias de reducción de CO<sub>2</sub> deben perfilarse a los subsectores antes mencionados; de forma más específica, las ramas que deben tener prioridad, en cada uno de estos grupos, son: la producción de cemento, la de hierro y acero, y la producción de azúcar, respectivamente.

La información valiosa que brinda el LMDI al proporcionar el efecto de cada factor determinante en la variación de CO<sub>2</sub>, y de manera desagregada la contribución de cada subsector en términos de su aportación en el cambio de las emisiones de CO<sub>2</sub>, es una herramienta de gran valor que debe tomarse en cuenta para determinar con precisión hacia dónde deben dirigirse las estrategias de reducción de emisiones; y una vez aplicadas, la misma metodología puede indicar si tales acciones surtieron el efecto estipulado en el alcance de las metas establecidas.

## Referencias

- Agnolucci, P., Ekins, P., Iacopini, G., Anderson, K., Bows, A., Mander, S., & Shackley, S. (2009). Different scenarios for achieving radical reduction in carbon emissions: A decomposition analysis. *Ecological Economics*, 68(6), 1652-1666. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.09.005>
- Akpan, U. F., & Akpan, G. E. (2012). The contribution of energy consumption to Climate Change: A feasible policy direction. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2(1), 21-33.
- Alcántara, V., & Padilla, E. (2005). Análisis de las emisiones de CO<sub>2</sub> y sus factores explicativos en las diferentes áreas del mundo. *Revista de Economía Crítica*, (4), 17-37.
- Alves, M. R., & Moutinho, V. (Marzo, 2013). Decomposition analysis for energy-related CO<sub>2</sub> emissions intensity over 1996-2009 in Portuguese Industrial Sectors. *University of Evora. Working Paper. Evora, Portugal*.
- Ang, B. W. (2005). The LMDI approach to decomposition analysis: A practical guide. *Energy Policy* 33(7), 867-871. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.10.010>
- Ang, B. W., & Choi, K. H. (1997). Decomposition of aggregate energy and gas emission intensities for industry: A refined Divisia index method. *The Energy Journal*, 18 (3), 59-73.
- Boqiang, L., & Liu, K. (2017). Using LMDI to analyze the decoupling of carbon dioxide emissions from China's heavy industry. *Sustainability*, 9(7), 1198-1214. doi: <https://doi.org/10.3390/su9071198>
- Butnar, I., & Llop, M. (2011). Structural decomposition analysis and input-output subsystems: changes in CO<sub>2</sub> emissions of Spanish service sectors (2000-2005). *Ecological Economics*, 70(11), 2012-2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.05.017>
- Campo Robledo, J., & Olivares, W. (2013). Relación entre las emisiones de CO<sub>2</sub>, el consumo de energía y el PIB: el caso de los CIVETS. *Semestre económico*, 16(33), 45-65.

- Chen, L., Yang, Z., & Chen, B. (2013). Decomposition analysis of energy-related industrial CO<sub>2</sub> emissions in China. *Energies*, 6(5), 2319-2337. doi: <https://doi.org/10.3390/en6052319>
- Dai, Y., Zhu, J., & Song, H., (2015). Using LMDI approach to analyze changes in carbon dioxide emissions of China's logistics industry. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 8(3), 840-860. doi: <http://dx.doi.org/10.3926/jiem.14>
- Diakoulaki, D., & Mandaraka, M. (2007). Decomposition analysis for assessing the progress in decoupling industrial growth from CO<sub>2</sub> emissions in the EU manufacturing sector. *Energy Economics*, 29(4), 636-664. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2007.01.005>
- Duro, J. A. & Padilla, E. (2006). Análisis de los factores determinantes de las desigualdades internacionales en las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita aplicando el enfoque distributivo: una metodología de descomposición por factores de Kaya. Barcelona, España: Instituto de Estudios Fiscales.
- Feng, K., Davis, S. J., Sun, L., & Hubacek, K. (2015). Drivers of the US CO<sub>2</sub> emissions (1997-2013). *Nature Communications*, 6, 7714. doi: <https://doi.org/10.1038/ncomms8714>
- Fernández, G. P. (2012). *Técnicas de descomposición de variaciones basadas en índices Divisia*, (tesis doctoral). Universidad de Oviedo, Oviedo, España.
- Gutiérrez Escajeda, M. T. (2015). *Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero del sector industrial de San Luis Potosí: proyección al 2020 y propuesta de mitigación* (Tesis de doctorado). Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.
- Gutiérrez Escajeda, M. T., Medellín Milán, P., & Abrego Góngora C. J. (2016). Factores determinantes de las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al uso de combustibles en el sector industrial de San Luis Potosí. *Investigación y Ciencia*, 24(68), 22-28.
- Hamit-Hagggar, H. (2012). Greenhouse gas emissions, energy consumption and economic growth: A panel cointegration analysis from Canadian industrial sector perspective. *Energy Economics*, 34(1), 358-364. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2011.06.005>
- Huesca Reynoso, L., & Calderón Villareal C. (2015). La política social y la crisis económica: ¿son progresivas las transferencias en México? *Contaduría y Administración*, 60(52), 169-194. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cya.2015.08.015>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2012). *Sistema de cuentas nacionales de México. Producto interno bruto por entidad federativa 2007-2011*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía. Recuperado el 22 de noviembre de 2016 de [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/derivada/regionales/pib/2007-2011/702825003971.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/derivada/regionales/pib/2007-2011/702825003971.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Sistema de cuentas nacionales de México. Producto interno bruto por entidad federativa 2003-2008*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía. Recuperado el 22 de noviembre de 2016 de [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/derivada/regionales/pib/2003-2008/PIBE2008\\_2a.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/derivada/regionales/pib/2003-2008/PIBE2008_2a.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2006). *Sistema de cuentas nacionales de México. Producto interno bruto por entidad federativa 1999-2004*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía. Recuperado el 18 de octubre de 2016 de [http://centro.paot.org.mx/documentos/inegi/scnm\\_pib\\_99-04.pdf](http://centro.paot.org.mx/documentos/inegi/scnm_pib_99-04.pdf)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Lee, C. F., & Lin, S. J. (2001). Structural decomposition of CO<sub>2</sub> emissions from Taiwan's petrochemical industries. *Energy Policy*, 29(3), 237-244. doi: [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00117-8](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00117-8)

- Lee, K., & Oh, W. (2006). Analysis of CO<sub>2</sub> emissions in APEC countries: A time-series and a cross-sectional decomposition using the log mean Divisia method. *Energy Policy*, 34(17), 2779–2787. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.04.019>
- Liu, L. C., Fang, Y., Wu, G., & Wei, Y.-M. (2007). Using LMDI method to analyze the change of China's industrial CO<sub>2</sub> emissions from final fuel use: An empirical analysis. *Energy Policy*, 35(11), 5892–5900. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.07.010>
- Marrero, G. A., & Ramos-Real, F. J. (2013). Activity sectors and energy intensity: Decomposition analysis and policy implications for European countries (1991–2005). *Energies*, 6(5), 2521–2540. doi: <https://doi.org/10.3390/en6052521>
- Mejía-Reyes, P., & Mejía-Reyes A. (2007). Fluctuaciones cíclicas en México y en el estado de México en el contexto del TLCAN: ¿cuáles son los hechos? *Economía, Sociedad y Territorio*, 7(25), 103–127.
- O'Mahony, T. (2013). Decomposition of Ireland's carbon emissions from 1990–2010: an extended Kaya identity. *Energy Policy*, 59, 573–581. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.04.013>
- Sahu, S., & Narayanan, K. (2010). Decomposition of industrial energy consumption in Indian manufacturing: the energy intensity approach. *Journal of Environmental Management and Tourism* 1(1), 22–38.
- Samaniego, J. L., & Galindo, L. M. (2009). Escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero asociados a combustibles fósiles y cemento en América Latina. *Economía Informa*, 360, 40–66.
- Szép, T. S. (2013). Eight methods for decomposing the aggregate energy intensity of the economic structure. *Club of Economics in Miskolc*, 9(1), 77–84.
- Tapia Granados, J. A., Lonides, L. E., & Carpintero, O. (2012). Climate change and the world economy: short-run determinants of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Environmental Science and Policy*, 21, 50–62. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2012.03.008>
- Wang, C., Wang, F., Zhang, H., Ye, Y., Wu, Q., & Su, Y. (2014). Carbon emissions decomposition and environmental mitigation policy recommendations for sustainable development in Shandong province. *Sustainability*, 6(11), 8164–8179. doi: <https://doi.org/10.3390/su6118164>
- Xiao, B., Niu, D., & Guo, X. (2016). The driving forces of changes in CO<sub>2</sub> emissions in China: A structural decomposition analysis. *Energies*, 9(4), 259–276. doi: <https://doi.org/10.3390/en9040259>
- Yamaji, K., Matsushashi, R., Nagata, Y. & Kaya, Y. (1991). An integrated system for CO<sub>2</sub>/Energy/GNP analysis: case studies on economic measures for CO<sub>2</sub> reduction in Japan. Tech. Rep. March 19 International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
- Yue, T., Long, R., Chen, H., & Zhao, X. (2013). The optimal CO<sub>2</sub> emissions reduction path in Jiangsu province: An expanded IPAT approach. *Applied Energy*, 112, 1510–1517. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.046>
- Zhang, M., Mu, H., & Ning, Y. (2009). Accounting for energy-related CO<sub>2</sub> emission in China, 1991–2006. *Energy Policy*, 37(3), 767–773. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.11.025>
- Zhao, M., Tan, L., Zhang, W., Ji, M., Liu, Y., & Yu, L. (2010). Decomposing the influencing factors of industrial carbon emissions in Shanghai using the LMDI method. *Energy*, 35(6), 2505–2510. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.049>