


Efectos del crecimiento económico en las emisiones de CO2 en América del Norte


Economic growth effects on CO2 emissions in North America

David Mendoza Tinoco¹, Lilian Albornoz Mendoza² y Alfonso Mercado García³

Fecha de recepción: 10 de noviembre del 2023

Fecha de aceptación: 15 de febrero del 2024

1 Nacionalidad: mexicana. Adscripción: Universidad Autónoma de Coahuila  ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0974-4810> Correo: d.mendoza@uadec.edu.mx

2 Nacionalidad: mexicana. Adscripción: Universidad Autónoma de Yucatán  ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6888-1073> Correo: lilian.albornoz@correo.uady.mx

3 Nacionalidad: mexicana. Adscripción: El Colegio de México  ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3789-5920> Correo: amercado@colmex.mx



Clasificada como competente internacional por Conahcyt



LICENCIA:
Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Resumen

Este artículo examina la heterogeneidad, en el ámbito ambiental, de los 3 países que componen la región de Norteamérica, específicamente en la emisión de CO₂, el principal gas efecto invernadero. Por un lado, Estados Unidos es un gran emisor de CO₂ (19% de las emisiones globales acumuladas en 1990-2020), solamente superado por China a partir de 2005. Por otro lado, Canadá y México son emisores relativamente pequeños a escala global (respectivamente 1.8% y 1.4% de las emisiones globales acumuladas en 1990-2020), pero con grandes diferencias económicas y tecnológicas. En estas condiciones, el objetivo de la investigación es encontrar diferencias y similitudes entre los tres países respecto de las tendencias de emisiones de CO₂ y sus factores estructurales conductores: los efectos escala, tecnológico y composición, con base en datos anuales de 2001 a 2014. Con un análisis de descomposición estructural, se encontró que, en general, el efecto escala fue contaminante y dominó en el periodo, mientras que el efecto tecnológico resultó anticontaminante, además de un efecto composición pequeño y ambivalente (positivo en unos años y negativo en otros). Se concluye que hay un proceso de convergencia en la intensidad de emisiones por valor del PIB y respecto de los tres efectos mencionados. También se concluye que las características de los tres efectos en México fueron parecidas a las de Estados Unidos, a las cuales Canadá se aproximó durante el periodo de análisis.

Palabras clave: Análisis de descomposición estructural, análisis Insumo-Producto, Emisiones de CO₂, Norteamérica.

Abstract

This paper examines the heterogeneity in the environmental field, specifically in the emission of the main of the greenhouse gases, CO₂, within the 3 countries composing the North American region. On the one hand, the United States is a large emitter of CO₂ (19% of global emissions accumulated in 1990-2020), only surpassed by China as of 2005. On the other hand, Canada and Mexico are relatively small emitters on a global scale (1.8% and 1.4% of global emissions accumulated in 1990-2020, respectively), but with large economic and technological differences. Under these conditions, the objective of this research is to find differences and similarities between the three countries regarding CO₂ emissions trends and their driving structural factors: scale, technological and composition effects, based on annual data from 2001 to 2014. With a structural decomposition analysis, we found that, in general, the scale effect was polluting and dominating in the period, while the technological effect was anti-polluting, in addition to a small and ambivalent composition effect (positive in some years and negative in others). It is concluded that there is a process of convergence in the intensity of emissions per GDP value and with respect to the three mentioned effects. It is also concluded that the characteristics of the three effects in Mexico were like those of the United States, while Canada approached along the analysis period.

Keywords: Structural decomposition analysis, Input-Output analysis, CO₂ Emissions, North America.

Introducción

América del Norte es una región con enormes diferencias entre sus tres países componentes, sobre todo entre México, el menos desarrollado, y Estados Unidos y Canadá, los más desarrollados. Una de estas diferencias que ha sido poco investigada es la ambiental; más específicamente, la relacionada con la contribución al cambio climático por medio de emisiones de gases efecto invernadero, de los cuales el dióxido de carbono (fórmula química CO₂) es el de mayor participación. Estados Unidos había figurado como el mayor emisor CO₂ histórico en el planeta (19% de las emisiones globales acumuladas en 1990-2020), superado por China (22% de las emisiones globales acumuladas en 1990-2020) a partir de 2005 según el Banco Mundial (2023). En cambio, Canadá y México han sido emisores relativamente moderados (respectivamente 1.8% y 1.4% de las emisiones globales acumuladas en 1990-2020), de acuerdo con dicha fuente.

Diversas investigaciones analizan los cambios en las emisiones de CO₂ relacionados a las variaciones en el desempeño económico, a partir de la contribución de sus componentes estructurales. Enfocados en el nivel de producción, y específicamente en sus variaciones, se han hecho acercamientos teóricos para analizar los factores que las determinan. En particular, siguiendo la determinación del producto desde la demanda intermedia y final, se separan las diferencias en la producción de un período a otro en tres efectos: tecnología, composición y escala.

Dado que América del Norte es la región (junto con Asia) que más ha contribuido en las emisiones de CO₂ históricas, es importante identificar la forma en que los factores estructurales de la economía han contribuido a este fenómeno, pero también la contribución relativa de los países y sectores económicos de la región. Esta información sería de ayuda para la implementación de estrategias de mitigación más eficaces a nivel regional.

Con este fin, este trabajo utiliza el Análisis de Descomposición Estructural (ADE) para hacer una evaluación comparativa de la contribución de los factores estructurales a las emisiones de CO₂ en los países de Norteamérica.

Después de este apartado, se ofrecen los siguientes. El apartado 2 brinda brevemente comparaciones preliminares entre los tres países respecto de las emisiones de CO₂. El apartado 3 explica la metodología y las fuentes estadísticas del estudio. El apartado 4 presenta los principales resultados. Finalmente, el apartado 5 ofrece las conclusiones.

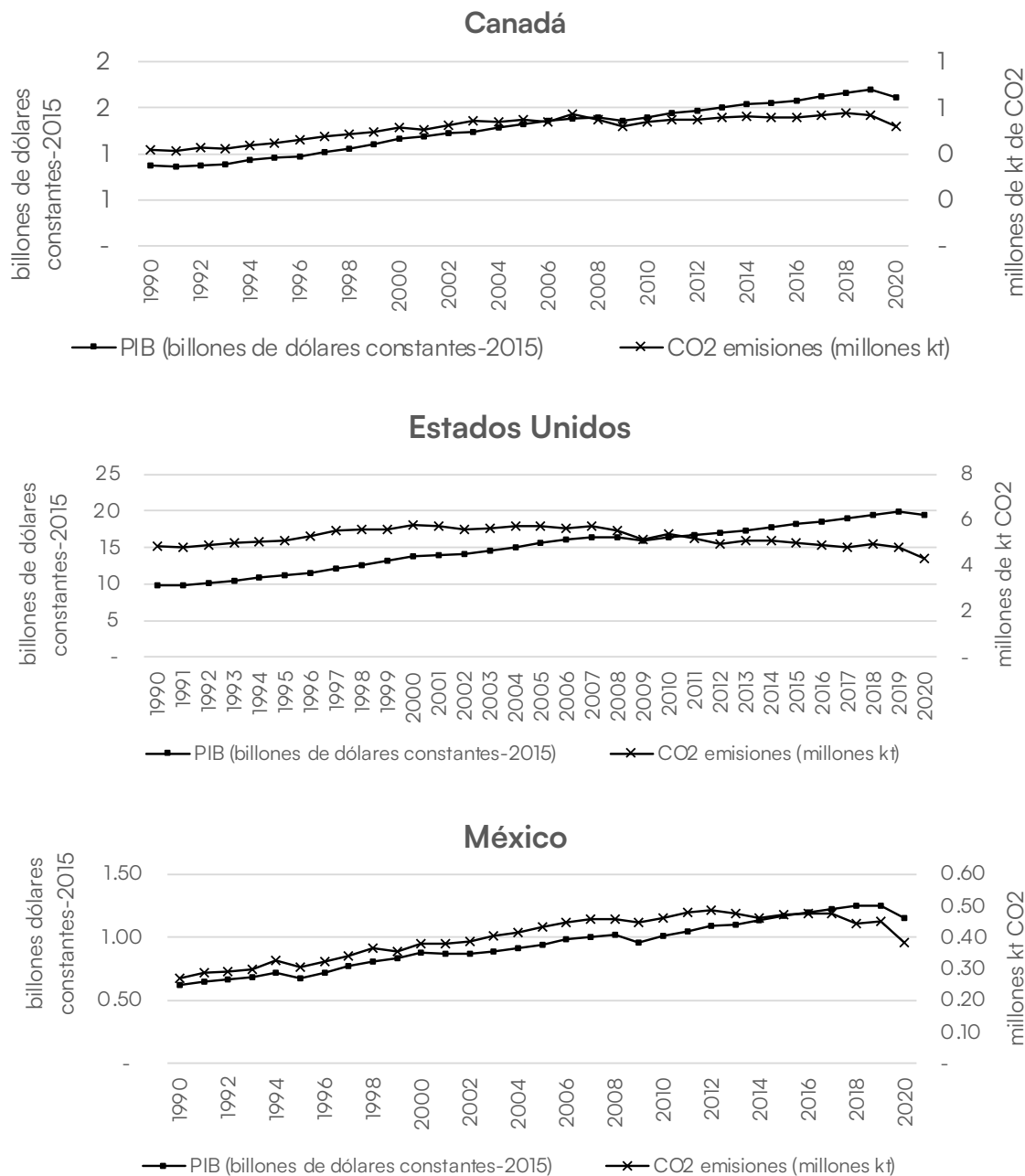
1. Comparaciones preliminares

Una breve contextualización de la relación entre la economía y el medio ambiente justifica la relevancia de este trabajo, para poder determinar la composición estructural de los factores que han generado los cambios en dichos ámbitos. Para operacionalizar el análisis, se presentan los datos del PIB total de cada país, como variable de la economía; y las emisiones totales de CO₂, como variable ambiental.

La Gráfica 1 presenta los datos de ambas variables para cada uno de los países. Se observa un crecimiento promedio generalizado para los tres países. Sin embargo, su relación con las emisiones de CO₂ son heterogéneas. Si bien, para el principio del período se observa una relación positiva clara entre crecimiento económico y emisiones de CO₂ para los tres países, Estados Unidos muestra el más claro desacoplamiento en estas tendencias. Para Canadá, es a partir del 2008 que se genera un cambio en la correlación de las variables, donde son las emisiones de CO₂ las que cambian hacia una trayectoria

descendente. El caso mexicano presenta el más notable acoplamiento entre las emisiones de CO₂ y el crecimiento económico. Sin embargo, también se observa un cambio en esta correlación después de 2013. Es evidente que el nivel de emisiones de CO₂ está fuertemente correlacionado al nivel de producción, sin embargo, se han presentado cambios estructurales significativos en las trayectorias de las variables. Los siguientes apartados dan cuenta de la contribución de cada uno de los factores estructurales (tecnología, composición y escala) a estos cambios.

Gráfica 1. PIB y emisiones de CO₂



Fuente: Elaboración propia con datos del Banco Mundial.

De acuerdo con las estadísticas ambientales del Banco Mundial (2023), en 1990, Estados Unidos generaba emisiones anuales de CO₂ equivalentes a 18 veces las de México y 12 las de Canadá, proporciones que vinieron bajando hasta 11 y 8 veces respectivamente en 2019. Esta fuente estadística también indica que Estados Unidos vino reduciendo de 1997 a 2019 su intensidad de emisiones por valor del producto interno bruto hasta la mitad (de 0.45 a 0.23 kilogramos de emisiones de CO₂ por dólar del PIB a PPP de 2017). También se observa una tendencia decreciente en el índice de emisiones per cápita, el cual era relativamente elevado en Estados Unidos y Canadá y declinó en el período de análisis, sobre todo en Estados Unidos, cerrando un poco la brecha con el menor índice de México. En efecto, en Estados Unidos, el índice fue 20.3 toneladas de emisiones de CO₂ por persona en 1997 y 14.7 en 2019; en Canadá fue 15.9 y 15.4 en dichos años, y, en México, 3.7 y 3.6, respectivamente. Obsérvese que, en 2019, el índice de Estados Unidos fue menor que el de Canadá a partir de 2015.

Estas tendencias sugieren una gran heterogeneidad de factores estructurales en la región de América del Norte que establecen una diferenciación cambiante entre los tres países. El objetivo del capítulo, entonces, es explorar diferencias y similitudes entre los tres países de la región respecto de las tendencias de las emisiones de CO₂ y sus factores estructurales conductores, tales como los efectos escala, tecnológico y composición, con base en datos anuales de 2001 a 2014.

1.1 Antecedentes empíricos

Se define, en primera instancia, los factores estructurales de los cambios en emisiones de CO₂.

- a) **Efecto escala.** Mide la evolución de la emisión de contaminantes inducida por el cambio del tamaño de una economía. Este efecto se compone de dos factores: 1) Riqueza, produciendo un incremento en el consumo per cápita, y 2) Población, el cual consiste en el crecimiento de las emisiones como consecuencia del crecimiento en el número de habitantes de la población.
- b) **Efecto composición.** Se refiere al cambio en la emisión de contaminantes por efecto de las transformaciones en la estructura de los sectores la economía, ya se trate de un incremento en la producción de ramas contaminadoras o de su decremento.
- c) **Efecto tecnología.** Indica cómo impactan al crecimiento de la contaminación los cambios tecnológicos asociados a la reducción de la contaminación y al crecimiento económico en general. El efecto tecnología también se compone de dos factores: 1) Ecoeficiencia, el cual se refiere al impacto del cambio tecnológico directamente vinculado a la reducción del volumen de emisiones, y 2) Tecnoeficiencia, el cual mide la contribución de las mejoras tecnológicas en el uso de los insumos de los procesos productivos.

Diversas investigaciones han aplicado el Análisis de Descomposición Estructural para analizar las variaciones en las emisiones de CO₂ a partir de su relación con la actividad económica. Los principales métodos son el Análisis de Descomposición del Índice (ADI) y el Análisis de Descomposición Estructural. Esta investigación se basa en este último, debido a que es aplicado al análisis de Insumo Producto, el cual permite el análisis no sólo agregado, sino también a nivel de sector económico.

Los análisis de cambio estructural con el método ADE se remontan a los trabajos relacionados a las extensiones del modelo de Insumo Producto (Su & Ang, 2012). Otros estudios han analizado la consistencia metodológica del indicador, donde una propuesta para asegurar una descomposición exacta es la descomposición aditiva con ponderación equitativa de los factores interactivos (Dietzenbacher & Los, 1998). Estudios seminales de aplicación del análisis extendido al uso de energía y emisiones de CO₂,

como (Casler & Rose, 1998) encuentran que el efecto sustitución de combustibles (tecnología) son los principales factores que contribuyen en la reducción de emisiones de CO₂, mientras que el factor que más contribuye a las emisiones es la demanda final. Su y Ang (2012) revisan 44 investigaciones y determinan que el modelo desarrollado por Dietzenbacher y Los (1998) ha sido el más utilizado en el análisis de descomposición estructural de emisiones de CO₂ y uso de energía.

En cuanto al análisis de descomposición para la región seleccionada, se encuentra muy poca literatura para el caso canadiense. Un estudio reciente (Talaei, Gemechu, & Kumar, 2020) aplica el método de descomposición Índice Divisia de Media Logarítmica y encuentra efectos mitigadores de CO₂ en los cambios de composición sectorial hacia industrias bajas en carbono, así como en la sustitución de combustibles fósiles por fuentes menos contaminantes. Sin embargo, encuentra un efecto emisor en la intensidad de CO₂ por unidad de producto, principalmente en la industria minera. También encuentran un efecto contaminante por escala de la economía.

En el caso de Estados Unidos, Kaivo-oja, y otros (2014) encuentran que el efecto escala, o por crecimiento económico, es el principal factor emisor de CO₂ para el período 1973-2010, y que son los efectos composición (estructura económica) y tecnología (intensidad de CO₂ por unidad de producto) los principales factores mitigadores de CO₂. Por su parte, (Vinuya, DiFurio y Sandoval (2010) aplican la descomposición estructural de la economía estadounidense para el período 1990-2004, con resultados muy similares, donde son la reducción en intensidad de CO₂ por unidad de energía y producto, y la transición hacia combustibles menos contaminantes, los que compensan el efecto contaminante del incremento del ingreso per cápita y la población. Otros estudios encuentran similares resultados para Estados Unidos (Sesso, Amâncio-Vieira, Zapparoli, & Sesso Filho, 2020; Casler & Rose, 1998; Shahbaz, Adom, & Hammoudeh, 2019).

Para México, diversos estudios coinciden en que el efecto tecnología, medido como la intensidad de emisiones por unidad de producto, es el principal factor mitigador de emisiones de CO₂, mientras que el efecto escala, medido por la demanda final, es el factor que mayor contribuye al incremento de las emisiones (González & Martínez, 2012; Sheinbaum-Pardo, Mora-Pérez, & Robles-Morales, 2012; Macías, 2015).

Dentro de las investigaciones de análisis multirregional, Andreoni y Galmarini (2016) realizan un análisis de descomposición para 33 países, usando la base de datos de la World InputOutput Database (WIOD), y encuentran que, en los tres países de la región de Norteamérica, es el efecto escala (o demanda agregada) el principal factor que promueve las emisiones de CO₂. También encuentran que, para Estados Unidos y México, el efecto tecnología, medido como cantidad de CO₂ por unidad de energía, y esta a su vez por unidad de producto, funge como factor mitigador de emisiones. Sin embargo, se encuentra que en Canadá se incrementó la intensidad de emisiones por unidad de producto. Finalmente, el efecto composición, que aquí se mide como la estructura relativa de cada país respecto al desempeño global, resulta un factor mitigador de emisiones en las tres economías. Por su parte, Wang, Ang, y Su (2017) encuentra que, para Canadá y Estados Unidos, el efecto tecnología contribuye a la mitigación de CO₂, mientras que para México el efecto es no significativo. Asimismo, encuentra que la demanda final es un factor importante en las emisiones de Estados Unidos.

2. Metodología y fuente de las estadísticas

2.1 Metodología

El análisis de las causas de las tendencias de las emisiones de CO₂, se hace mediante el cálculo de la variación de sus componentes estructurales. Es decir, se estima la proporción del cambio en emisiones que se atribuye a cada uno de los factores asociados a su producción. Desde el enfoque de la economía ecológica, es la actividad económica la que genera las emisiones a partir de las diferentes fases de producción y consumo (Alier & Roca, 2015). Utilizando un enfoque metodológico basado en la teoría de la escuela keynesiana, se vinculan los cambios en las variables ambientales a los cambios en las variables económicas originadas por cambios en la demanda.

Para medir el grado de estas relaciones, se lleva a cabo un ADE, aplicado a la ampliación del modelo de insumo-producto (MIP). Se trata de una ampliación del modelo en términos ambientales, ya que es posible, mediante la construcción de una variable satélite que pueda relacionarse directamente al nivel de producción, su incorporación al modelo. Esto permite generar una relación (coeficiente técnico) directa entre la variable satélite y la actividad económica, y asimismo permite que los elementos estructurales de la economía presentados en el modelo de IP puedan relacionarse a cambios en dicha variable (Miller & Blair, 2009). Las variables satélites para nuestro análisis son las emisiones de CO₂ equivalente por sector económico. A continuación, se detallan estas relaciones.

En primera instancia, MIP incorpora la conceptualización de la economía como un flujo circular, en la cual los productos de unos sectores son al mismo tiempo insumos para otra industria, en la cual, a su vez, son insumos para la producción de bienes y servicios para la demanda final. Estos bienes y servicios son consumidos con el ingreso generado por el pago de factores. Así, se estructura un arreglo matricial que incorpora las transacciones intersectoriales de consumo intermedio, la matriz que incorpora el pago a factores o valor agregado, y la matriz de demanda final. Para el MIP, se conceptualizan las relaciones de estos elementos bajo los fundamentos de las funciones de producción de Leontief, los cuales presentan básicamente las interrelaciones entre producción, insumos y demanda final en un sistema de ecuaciones lineales. Se supone que cada sector genera un solo producto, de tal manera que este sistema tiene igual número de ecuaciones (sectores económicos) y de incógnitas. Se define el número de sectores como n .

Sean entonces:

Z: La matriz cuadrada de demanda intermedia de tamaño $n \times n$

x: El vector de producción total por sector, de tamaño $n \times 1$

f: El vector de demanda final por sector, de tamaño $n \times 1$

Entonces la matriz diagonal de producción total se define como la suma de los insumos intermedios y la demanda final⁴:

$$\hat{x} = Z + \hat{f} \quad \text{Ecuación 1}$$

Asimismo, se define la matriz de coeficientes técnicos, A, como la matriz cuadrada de demanda intermedia por unidad de producto total, $A = Z / \hat{x}$

4 Para la notación matemática, se representan con minúsculas los vectores columna, con mayúscula las matrices, el acento circunflejo indica la matriz diagonal de un vector, y los escalares con minúsculas en negritas.

Expresando la demanda final como la diferencia de la producción total menos la demanda intermedia,

$$\begin{aligned}\hat{f} &= \hat{x} - Z \\ &= \hat{x} - A\hat{x} \\ &= (I - A)\hat{x}\end{aligned}\tag{Ecuación 2}$$

y finalmente despejando para la producción total se obtiene el modelo de IP.

$$\hat{x} = (I - A)^{-1}\hat{f}\tag{Ecuación 3}$$

Donde $(I - A)^{-1}$ se conoce como la matriz inversa de Leontief y representa los requerimientos intermedios directos e indirectos por unidad de demanda final.

Se determina, de este modo, la producción en función de los requerimientos intermedios totales y la producción de los bienes de consumo final.

A continuación, se incorpora el vector renglón de la variable satélite al modelo, vinculándola a través de lo que se denomina vector renglón de intensidades, el cual se obtiene de la división, sector por sector, del valor de la variable satélite entre el valor correspondiente del nivel de producto total, $\epsilon = e / \hat{x}$.

De esta forma, el nivel de emisiones de CO2 se puede representar como la multiplicación del vector de intensidades, la matriz de insumos totales (matriz inversa de Leontief) y la demanda final, como en la ecuación siguiente:

$$e = \epsilon (I - A)^{-1}\hat{f}\tag{Ecuación 4}$$

Posteriormente, la demanda final se puede descomponer en dos factores: composición y escala. Dividiendo y multiplicando (al final) por el total de la demanda final se deja inalterada la ecuación, y se reacomoda de forma que cada elemento del vector de demanda final se divida por el total de la demanda final, y se multiplica posteriormente por este mismo elemento, como en la siguiente ecuación:

$$e = \epsilon (I - A)^{-1} \frac{\hat{f}}{\hat{f}} f\tag{Ecuación 5}$$

De esta forma, el nivel de emisiones de CO2 está determinado por tres factores estructurales: a) tecnología, al que corresponden los elementos de intensidad de emisiones multiplicado por la matriz inversa de Leontief, $\epsilon (I - A)^{-1}$ b) composición, que hace referencia a la estructura de consumo de la economía, determinada por el peso relativo que la demanda final de cada sector tiene en el total de la demanda final, $\frac{\hat{f}}{\hat{f}}$; y c) escala, que incorpora el tamaño de población y su nivel de ingreso, f .

A partir de esta ecuación se realiza el ADE, el cual está enfocado en analizar los determinantes de las variaciones en el tiempo de la variable. Como tal, es necesario obtener las variaciones de la variable⁵, en función de la variación de sus componentes. Se introduce el subíndice 1 para hacer referencia en el año final y el subíndice 0 para hacer referencia al año inicial. También, para simplificar la notación se redefinen los componentes de la forma siguiente:

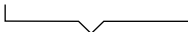
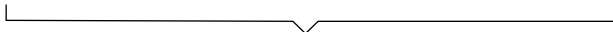
5 El símbolo indica la variación de la variable en el tiempo.

Antes	Ahora	Efecto
$\epsilon(I-A)^{-1}$	T	Efecto tecnología
$\frac{\hat{f}}{f}$	C	Efecto composición
f	S	Efecto escala

Así, se expresa el cambio en la variable ambiental de la siguiente forma:

$$\Delta e = e_1 - e_0 = T_1 C_1 S_1 - T_0 C_0 S_0 \tag{Ecuación 6}$$

Se aplica la separación de los efectos de acuerdo con el enfoque de índice de Laspeyres, con efectos interactivos multiplicatorios, y con distribución de pesos equitativos. Es decir, se considera como año base el inicial, además se considera el cambio de una variable a la vez, atribuible a cada factor. La descomposición se divide en efectos directos e indirectos. Los efectos directos de cada factor son cuando sólo cambia una variable y las demás permanecen constantes. Los efectos indirectos se calculan cuando dos o más variables cambian al mismo tiempo, distribuyendo en iguales proporciones el efecto entre los factores involucrados.

$\Delta e =$		Cambio total
$\Delta T C_0 S_0$	$+ \frac{1}{2} (\Delta T \Delta C S_0) + \frac{1}{2} (\Delta T C_0 \Delta S) + \frac{1}{3} (\Delta T \Delta C \Delta S)$	Efecto tecnología
$+ T_0 \Delta C S_0$	$+ \frac{1}{2} (\Delta T \Delta C S_0) + \frac{1}{2} (T_0 \Delta C \Delta S) + \frac{1}{3} (\Delta T \Delta C \Delta S)$	Efecto composición
$+ T_0 C_0 \Delta S$	$+ \frac{1}{2} (T_0 \Delta C \Delta S) + \frac{1}{2} (\Delta T_0 C \Delta S) + \frac{1}{3} (\Delta T \Delta C \Delta S)$	Efecto escala
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center; width: 30%;">  <p>Efectos directos</p> </div> <div style="text-align: center; width: 65%;">  <p>Efectos indirectos</p> </div> </div>		

La suma de los tres efectos será igual al cambio total en la variable satélite (emisiones de CO2 en nuestro caso).

2.2 Fuente de los datos

Las cifras económicas utilizadas en el análisis corresponden a la base de datos mundial de insumo producto (World Input Output Database, WIOD), en su emisión de 2016 (Timmer, Dietzenbacher, Los, Stehrer, & De Vries, 20105). La base cuenta con un MIP multirregional sobre 28 países de la Unión Europea, 18 países de economías grandes en el mundo, y una región Resto del Mundo. La actividad interindustrial está dividida en 56 sectores y brinda datos anuales de 2001 a 2014. En el presente análisis se utilizaron los datos a precios del año anterior, con una unidad de medida en millones de dólares estadounidenses.

La variable satélite de emisiones de CO2 que se utiliza en el estudio es una extensión de las variables de la base de datos mencionada WIOD (Corsatea, y otros, 2019). Estas cifras tienen la misma desagregación de países y sectores que las cifras económicas. La base de datos ambientales ofrece información estadística anual de 2000 a 2016. Estos son datos en unidades de medida de kilotoneladas (kt) de CO2.

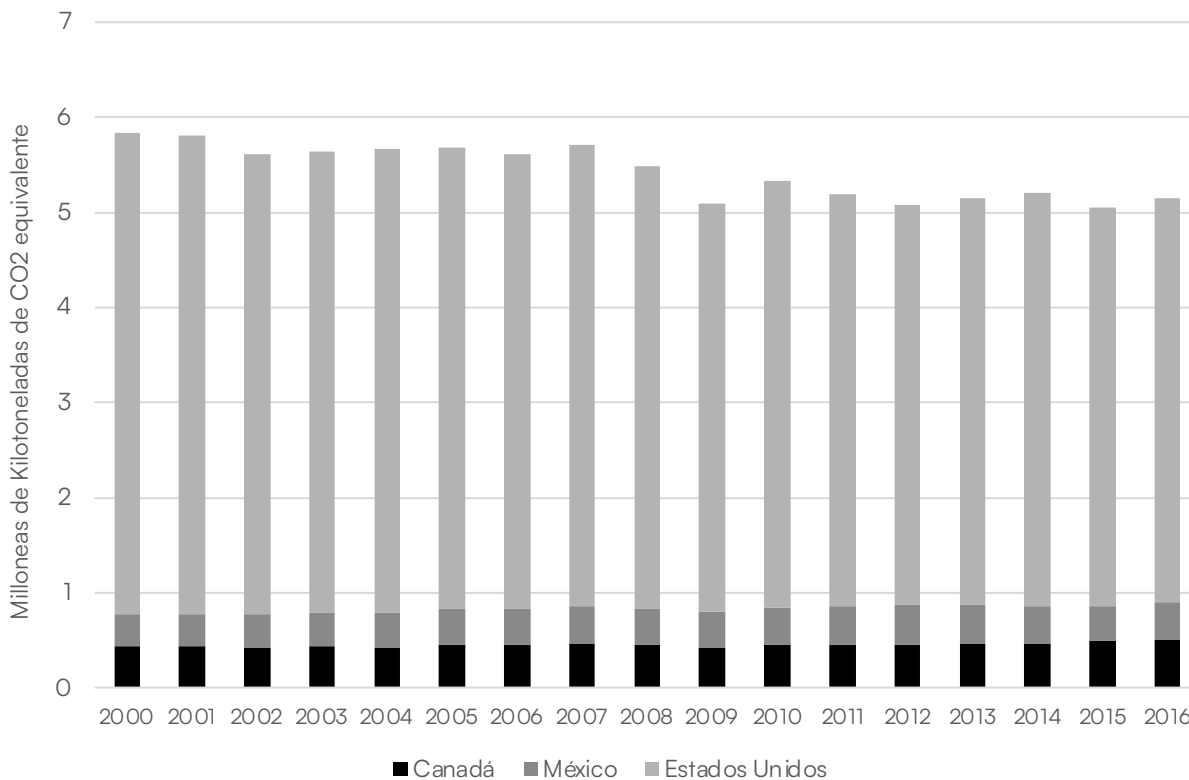
3. Resultados

Este apartado presenta los principales resultados del ADE aplicado a cada uno de los países que conforman la región de América del Norte, en el periodo de 2001 a 2014. Se comparan los resultados en cuanto a la evolución de las emisiones y las contribuciones relativas de los factores estructurales: tecnología, composición y escala. Finalmente, se hace un análisis sobre los sectores que más contribuyeron al cambio de emisiones en el periodo analizado, tanto para aumentarlas, como para disminuirlas.

3.1. Emisiones totales

De acuerdo con la WIOD (2016), la región de América del Norte ha tenido volúmenes de emisiones relativamente constantes durante el período estudiado (con una media de 5.42 millones de kilotoneladas de CO₂, y una desviación estándar de 0.27). La Gráfica 2 presenta la evolución y contribución de las emisiones totales para los tres países en el período de análisis. Se observa una ligera disminución a partir del año 2008. La contribución proporcional de cada país de la región también se ha mantenido relativamente constante, con leves variantes, observándose descensos en el volumen anual de emisiones en Estados Unidos y México, especialmente entre 2008 y 2016. En promedio, las emisiones de Canadá contribuyen en 8.4 %, las de México en 7 %, y las de Estados Unidos en 84.6 %. Sin embargo, las contribuciones relativas de Canadá y México aumentaron, pasando en el primer caso de 7.5 % en 2000, a 10 % en 2016, y, en el segundo, de 5.9 % a 7.4 %. Esta mayor participación relativa de México ocurrió con un volumen de emisiones decreciente en la región, principalmente impulsado por Estados Unidos.

Gráfica 2. Evolución y contribución de emisiones de CO₂ en Norteamérica (millones de kilotoneladas)

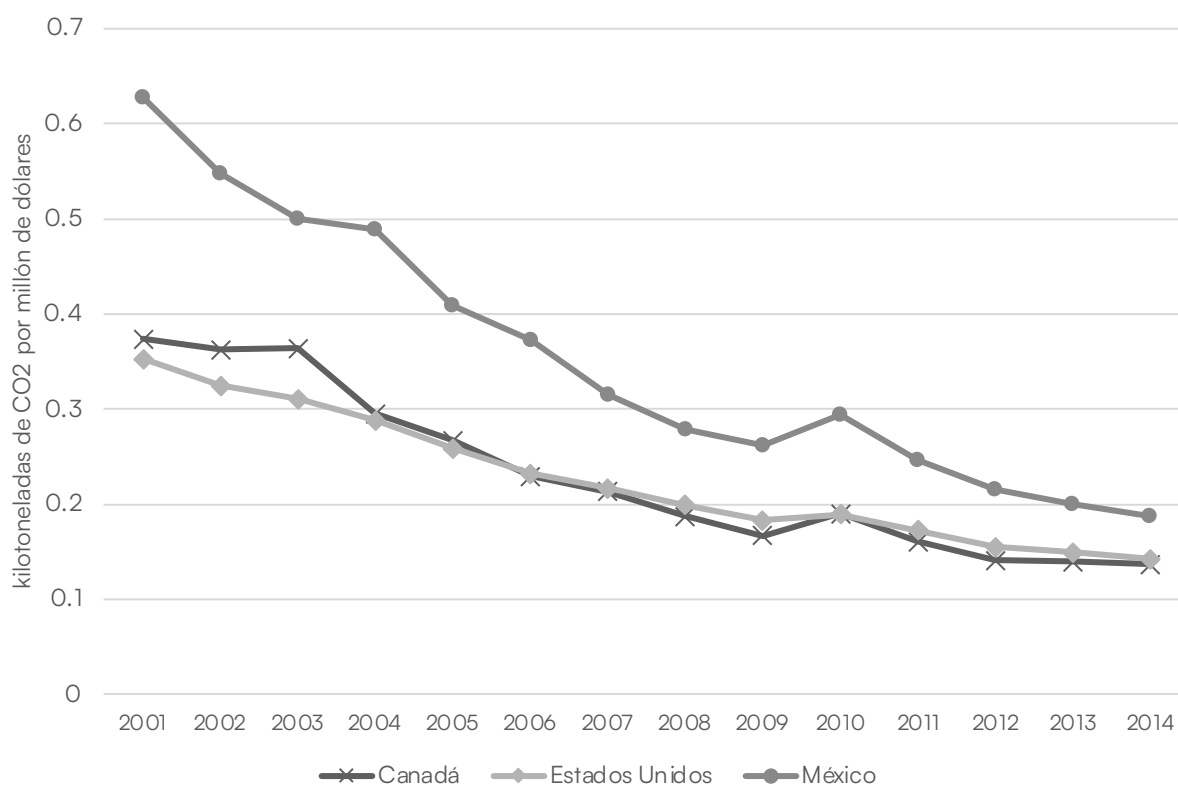


Fuente: Elaboración propia con datos de la WIOD2016

3.2 Intensidades

La intensidad de emisiones, definida aquí como unidades de emisiones de CO2 por unidad de producto total (kt de CO2 por millón de dólares), se redujo en la región durante el periodo de análisis (Ver Gráfica 3). Al principio del periodo Estados Unidos y Canadá contaban con un nivel de intensidad similar (0.35 y 0.37 respectivamente), mientras que México los superaba en un 75%. Otra tendencia interesante de observar es la reducción generalizada de la intensidad en la región que en promedio fue del 64%, además del cierre de la brecha de México respecto de Estados Unidos y Canadá que se redujo al 30%.

Gráfica 3. Evolución de la intensidad de emisiones por país



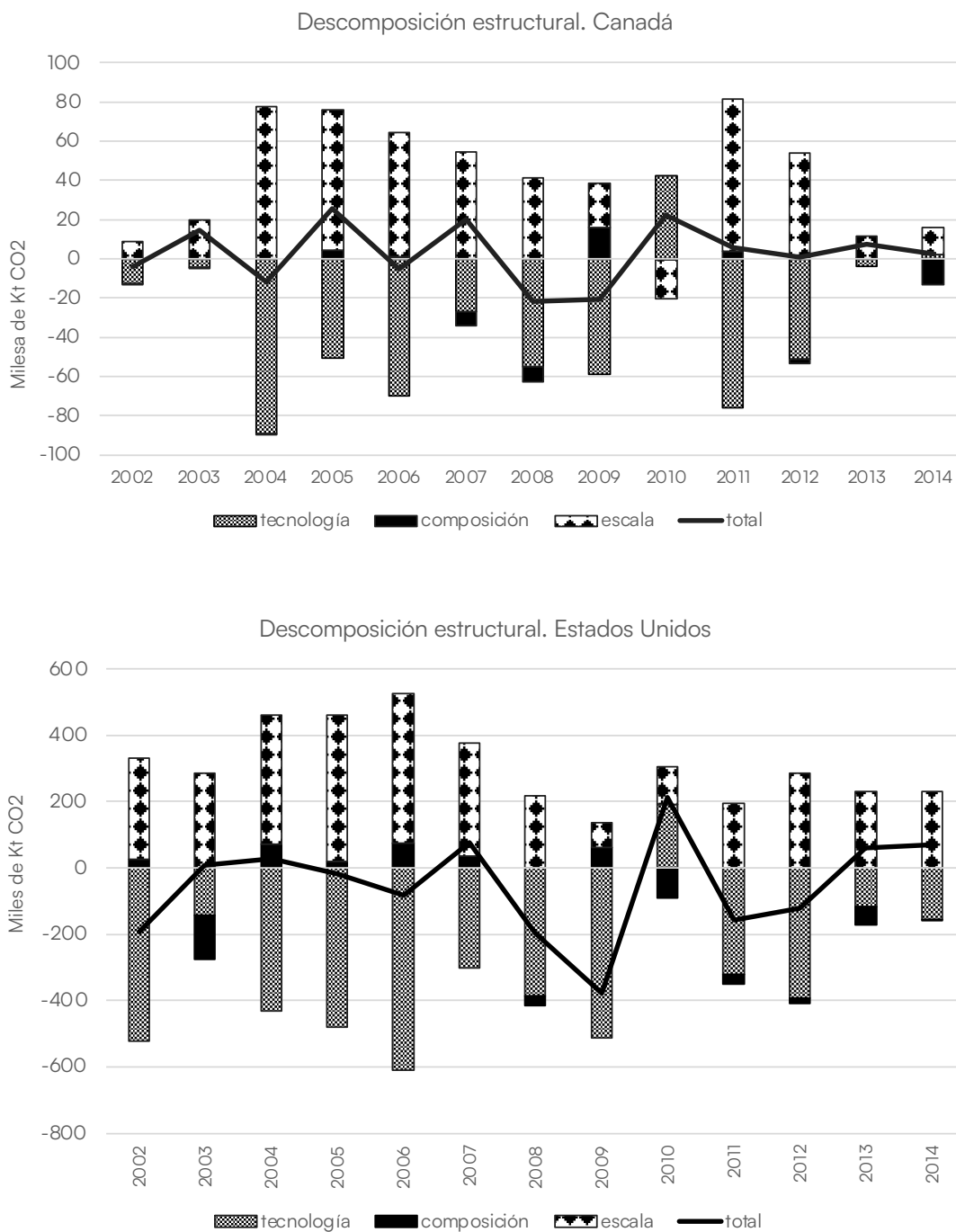
Fuente: Elaboración propia con datos de la WIOD2016.

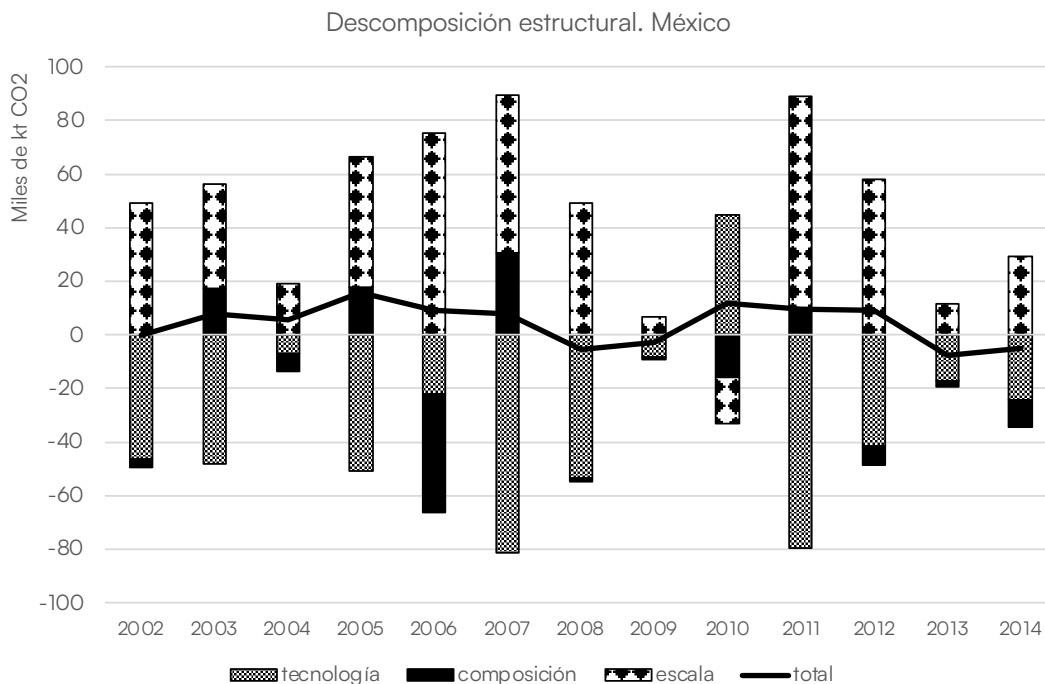
3.3 ADE en los tres países

Este apartado presenta los principales resultados del ADE de las emisiones de CO2 en cada uno de los países que conforman la región de América del Norte. La Gráfica 4 (referida a Estados Unidos, Canadá y México, respectivamente) ilustran estos resultados. Destacan algunos aspectos en términos regionales. En todos los casos, el efecto tecnología se presenta como mitigador de emisiones en todos los años, excepto en 2010. Asimismo, es el efecto escala el principal factor que impulsa las emisiones de CO2. Finalmente, se observa que el efecto composición es ambivalente, actuando en algunos años como mitigador y en otros como impulsor de emisiones.

También se observa, en los tres casos, una diferencia negativa en las emisiones de 2008 y 2009, posiblemente vinculada a la recesión financiera global en esos años. Es interesante observar que el efecto tecnología es muy relevante en la mayoría de los años para contrarrestar los efectos impulsores del tamaño de la economía (efecto escala).

Gráfica 4. Análisis de Descomposición Estructural para los países de Norteamérica





Fuente: Cálculos propios basados en los datos de la WIOD (2016).

Este análisis permite observar, año con año, las contribuciones de los factores tecnología, composición y escala, en las variaciones de las emisiones de CO₂. El análisis es consistente con la literatura, que en su mayoría encuentra que el efecto tecnología contribuye a mitigar las emisiones de CO₂. También es consistente con los hallazgos de que es el efecto escala el principal impulsor de las emisiones, es decir, el tamaño de la población y su nivel adquisitivo.

3.4 ADE en las industrias más contaminantes y mitigadoras de cada país

El ADE permite el análisis a nivel sectorial, ya que se basa en el análisis de IP. A continuación, se exponen los resultados en los sectores que más contribuyeron en el incremento y reducción de emisiones de cada país.

Se enfatiza el hecho de que el ADE es sobre los cambios en el nivel de las emisiones, más que su nivel total a lo largo del periodo. Sin embargo, una comparación entre los sectores más contaminantes (en promedio) y los cambios que presentan en sus emisiones resulta interesante, al observar que es en estos sectores, para los tres países, donde se concentran los que más contribuyeron en ambos sentidos, tanto en el incremento como en la reducción de las emisiones.

Canadá

Tabla 1. Sectores más contaminantes de Canadá

Sector	Producto (millones dólares)		CO2 (kt)		Intensidad media
	Promedio	%	Promedio	%	(CO2/Producto)
Suministro de electricidad, gas, vapor y aire acondicionado	36 149.95	1.63	105 960.48	23.33	2.93
Minas y canteras	117 639.85	5.30	72 476.52	15.96	0.62
Transporte terrestre y transporte por oleoductos	72 858.20	3.28	35 151.03	7.74	0.48
Transporte aéreo	12 551.56	0.57	28 428.34	6.26	2.26
Manufactura de metales básicos	37 828.50	1.71	25 977.22	5.72	0.69
Manufactura de productos refinados del petróleo	48 127.27	2.17	25 513.78	5.62	0.53
Transporte de agua	3 213.01	0.14	16 372.87	3.60	5.10
Manufactura de productos químicos.	18 280.76	0.82	14 267.61	3.14	0.78
Manufactura de productos minerales no metálicos	11 158.51	0.50	13 506.14	2.97	1.21
Producción agrícola y animal, caza	39 462.16	1.78	10 010.12	2.20	0.25
TOTAL	397 269.77	17.91	347 664.11	76.54	0.88

Fuente: Elaboración propia.

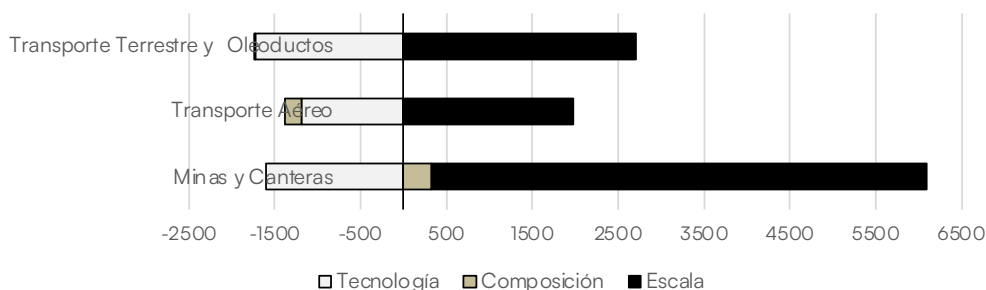
La Tabla 1 muestra los sectores que en promedio contribuyen en 76 % de las emisiones de CO2 de Canadá. Aunque son los sectores que más contaminan, su contribución a la producción es de sólo el 18 %, aunque se aprecia que son sectores transversales al funcionamiento de la economía⁶. Durante el período de análisis, Canadá presentó un incremento neto total de emisiones en una cantidad de 82 597.21 de kt de CO2, equivalentes a un incremento del 8 %.

En este contexto, se observa que el sector más contaminante (en promedio), el Suministro de Electricidad, Gas, Vapor y Aire Acondicionado, es el que en mayor medida contribuyó en la reducción de emisiones durante el periodo de análisis (49 % de la reducción se atribuye a este sector). Por otra parte, el segundo sector más contaminante, Minas y Canteras, es el que más contribuyó al incremento de emisiones (36 % del incremento se atribuye a este sector).

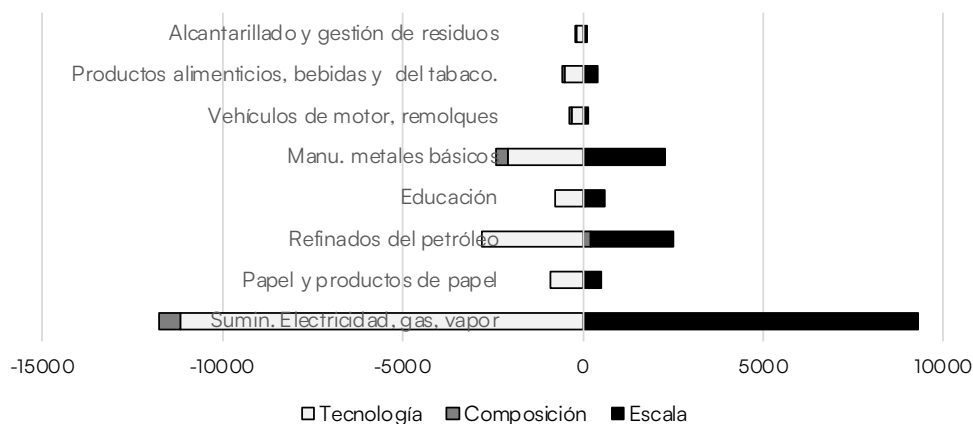
⁶ Un análisis de multiplicadores indicaría con precisión la importancia de los eslabonamientos, hacia atrás y hacia adelante, de cada sector para la economía. Este análisis queda fuera del ámbito de este trabajo.

Gráfica 5. Sectores que más contribuyeron al cambio de emisiones de CO2 en Canadá

Gráfica 5.a. Sectores que contribuyeron más al efecto contaminante.
 Canadá



Gráfica 5.b. Sectores que contribuyeron más al efecto mitigador.
 Canadá



Fuente: Cálculos propios basados en los datos de la WIOD (2016).

Por su parte, la Gráfica 5.a muestra el ADE para los sectores que contribuyeron en 87 % al incremento de emisiones. Se puede apreciar que es el efecto escala el que genera el mayor empuje a este fenómeno.

Por otro lado, la Gráfica 5.b muestra el ADE para los sectores que más contribuyeron en la mitigación de emisiones. El efecto tecnología es el que mayor impacto provocó en este resultado. Es interesante notar que al menos tres de los sectores más contaminantes (Suministro de electricidad, gas, vapor y aire acondicionado; Manufactura de metales básico; Manufactura de productos refinados del petróleo) que concentran casi el 30 % de emisiones de la economía canadiense, concentran casi el 60% del efecto mitigador en el período de análisis. Es decir, algunos de los sectores más contaminantes se están volviendo “menos sucios”, a partir de cambios tecnológicos.

Estados Unidos

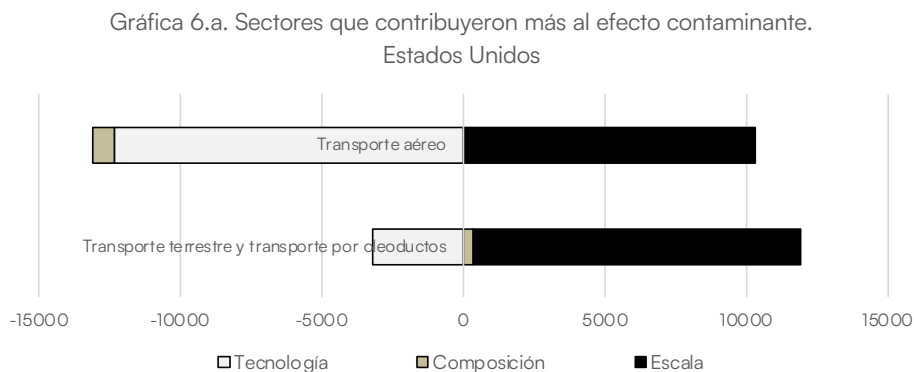
Tabla 2. Sectores más contaminantes de Estados Unidos

Sector	Producto (millones dólares)		CO2 (kt)		Intensidad media
	Promedio	%	Promedio	%	CO2/Producto
Suministro de electricidad, gas, vapor y aire acondicionado	332 303.56	1.52	2 282 976.21	49.65	6.87
Administración pública y defensa	2 539 934.92	11.64	259 797.35	5.65	0.10
Transporte terrestre y por oleoductos	340 563.11	1.56	219 122.28	4.77	0.64
Transporte aéreo	126 922.21	0.58	208 328.81	4.53	1.64
Manufactura de refinados del petróleo	71 978.78	2.16	172 915.89	3.76	0.37
Manufactura de productos químicos	402 947.15	1.85	165 699.87	3.60	0.41
Manufactura de metales básicos	189 793.99	0.87	124 487.99	2.71	0.66
Manufactura productos minerales no metálicos	89 771.41	0.41	120 348.80	2.62	1.34
Minas y canteras	382 221.58	1.75	110 848.73	2.41	0.29
TOTAL	4 876 436.70	22.36	3 664 525.94	79.70	0.75

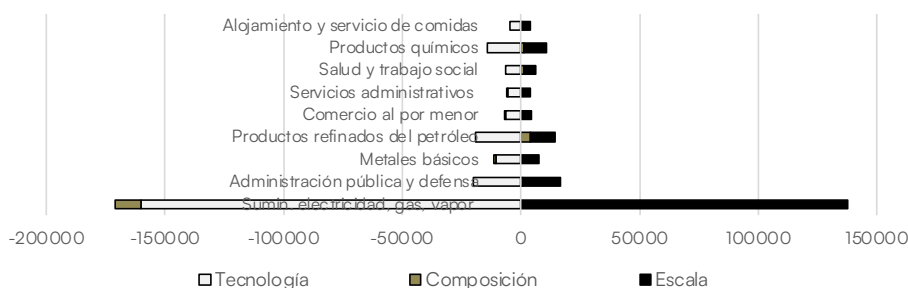
Fuente: Elaboración propia.

En el caso de Estados Unidos, la Tabla 2 muestra los sectores que en promedio contribuyen con el 80 % de las emisiones, es decir, los más contaminantes. En contraste, la contribución de estos sectores es del 22 % del producto nacional. Incluso el sector de mayores emisiones, Suministro de electricidad, gas, vapor y aire acondicionado, que contribuye con casi el 50 % de las emisiones totales, representa el 1.52 % del producto nacional. La relevancia del sector es, como ya se ha mencionado, como proveedora de insumos esenciales para el funcionamiento de las demás ramas productivas.

Gráfica 6. Sectores que más contribuyeron al cambio de emisiones de CO2 en Estados Unidos



Gráfica 6.b. Sectores que contribuyeron más al efecto mitigador.
 Estados Unidos



Fuente: Cálculos propios basados en los datos de la WIOD (2016).

Respecto al ADE, cabe destacar que Estados Unidos es el único país de la región que logró una disminución neta en el nivel emisiones durante el periodo de análisis, pasando de las 5 049 730 kt a 4 343 472 kt de CO₂, es decir, una reducción del 16 %. La Gráfica 6.b muestra los sectores que más contribuyeron en el 80 % de esta reducción. El efecto tecnología dominó al efecto escala, mientras que el efecto composición resulta un componente ambivalente y de proporciones poco significativas. Otro aspecto relevante que es el sector más contaminante el que concentró casi la mitad del efecto mitigador en dicho periodo para la economía estadounidense.

En cuanto a los sectores que más contribuyeron al incremento de emisiones en Estados Unidos, durante el periodo de análisis, sólo dos concentran más el 84 % de este efecto (Gráfica 6.a).

México

Tabla 3. Sectores más contaminantes de México

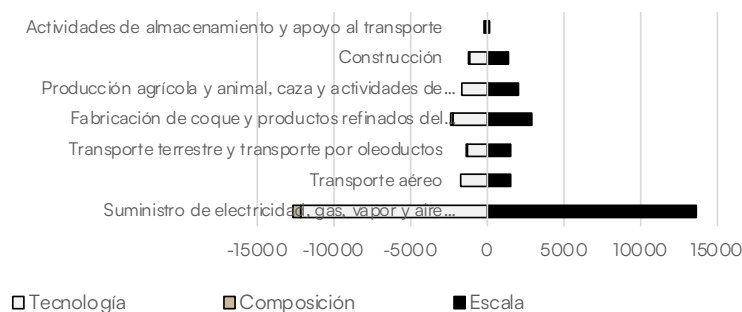
Sector	Producto (millones dólares)		CO ₂ (kt)		Intensidad media
	promedio	%	promedio	%	CO ₂ / Producto
Suministro de electricidad, gas, vapor y aire acondicionado	21 960.52	1.74	133 922.79	35.53	6.10
Manufactura de otros productos minerales no metálicos	13 555.55	1.08	29 531.43	7.83	2.18
Minas y canteras	65 396.39	5.19	27 378.30	7.26	0.42
Manufactura de coque y productos refinados del petróleo	43 758.14	3.47	26 195.62	6.95	0.60
Manufactura de metales básicos	23 439.73	1.86	22 056.25	5.85	0.94
Producción agrícola y animal, caza y actividades de servicios conexas	35 519.84	2.82	18 896.97	5.01	0.53
Transporte aéreo	4 618.25	0.37	16 216.55	4.30	3.51
Transporte terrestre y transporte por oleoductos	61 472.41	4.88	15 745.63	4.18	0.26
Manufactura de productos químicos y productos químicos.	35 700.00	2.83	15 424.58	4.09	0.43
TOTAL	305 420.82	24.23	305 368.11	81.01	1.00

Fuente: Elaboración propia.

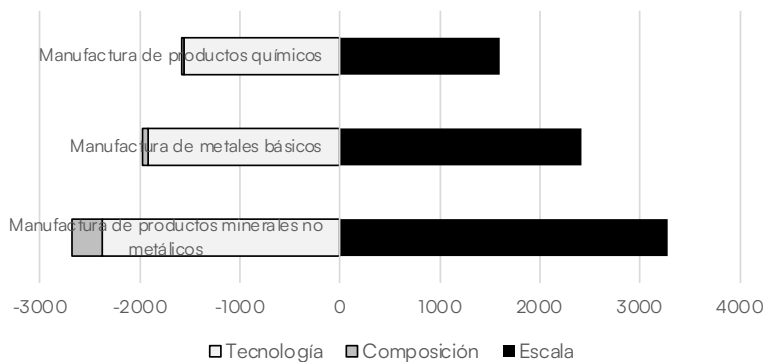
El caso mexicano, finalmente, presenta un incremento neto de emisiones durante el período de análisis. En la Tabla 3 se presentan los sectores que contribuyen, en promedio, al 80 % de las emisiones del país. Su contribución al producto, sin embargo, es del 24 %, situación que es similar a la de los otros dos países de la región. El nivel de emisiones aumentó 16 %, pasando de 343 768 kt a 399 017 kt de CO₂.

Gráfica 7. Sectores que más contribuyeron al cambio de emisiones de CO₂ en México

Gráfica 7.a. Sectores que contribuyeron más al efecto contaminante. México



Gráfica 7.b. Sectores que contribuyeron más al efecto mitigador. México



Fuente: Cálculos propios basados en los datos de la WIOD (2016).

La Gráfica 7.a muestra los sectores que contribuyeron en 82 % al efecto contaminante de la economía mexicana, siendo el efecto escala el que mayor injerencia tuvo. Estos sectores contribuyen en 22 % al producto nacional. Mientras que sólo 3 sectores concentraron el 91 % del efecto mitigador en la economía durante el período (ver Gráfica 7.b).

Los resultados del ADE, como se presentaron, permiten observar la contribución de los factores estructurales a los cambios en emisiones durante el período de análisis, en los tres países de la región de Norteamérica. Asimismo, el análisis, al estar basado en el modelo de IP, permite conocer dichos efectos en cada uno de los sectores que componen las economías, con lo que se puede conocer aquellos sectores que más contribución han tenido en los cambios de emisiones de CO en cada país.

Conclusiones

Con base en una metodología de análisis de descomposición estructural, este estudio encuentra diferencias y similitudes entre los tres países de la región respecto de las tendencias de las emisiones de CO₂ y sus factores estructurales conductores, tales como los efectos escala, tecnológico y composición, con base en datos anuales de 2001 a 2014.

Un resultado comparativo relevante es el de un proceso de convergencia en términos de la intensidad de emisiones por valor del PIB y respecto de los tres efectos mencionados. Con una tendencia decreciente de la intensidad regional agregada, las diferencias de intensidades entre los países se redujeron a lo largo del periodo, sobre todo entre Estados Unidos y los otros dos países, mostrando una convergencia.

En cuanto a los tres efectos en cada país, el efecto escala fue contaminante y dominó en el periodo, pero cerca de éste resultó un efecto tecnológico anticontaminante, además de un efecto composición pequeño y ambivalente (positivo en unos años y negativo en otros). En los años iniciales del periodo, en 2001 — 2003, los efectos diferían notablemente entre los países, siendo pequeños en Canadá y grandes en los otros dos países. También la evolución de los efectos difirió de 2004 a 2008, siendo decreciente en Canadá (después de que los efectos habían crecido de 2003 a 2004). Estas diferencias fueron desapareciendo hacia 2010, de manera que en los tres países se observaron efectos que, habiendo sido grandes en 2011, decrecieron de ese año a 2016. Es decir, después de diferentes sendas evolutivas, se observó una convergencia hacia patrones muy parecidos. El rol del efecto tecnológico anticontaminante, mitigando al efecto escala fue cada vez mayor relativamente.

Otro resultado es que, a lo largo del periodo estudiado, las características de los tres efectos en México fueron parecidas a las de Estados Unidos, a las cuales Canadá se aproximó. Ello se observa en el párrafo anterior, en especial los efectos en Estados Unidos y México, diferentes a los observados en Canadá, en una primera etapa (de 2001 a 2003) y la posterior convergencia, pero siendo regularmente el caso mexicano similar al estadounidense.

Con relación a la dinámica económica, se encontró que el crecimiento de la demanda final, como resultado de un incremento del PIB en la región, ha impulsado el aumento de las emisiones de CO₂ en el periodo de estudio. El aumento en la población y el consumo, conducen a una elevación en las emisiones del CO₂. Sin embargo, como muestra el caso de Estados Unidos, el cambio tecnológico puede jugar un papel importante en la reversión de la tendencia al aumento en las emisiones absolutas impulsada por la demanda final. Se debe apostar a la sustitución de insumos y procesos en los sectores más contaminantes y que constituyen sectores importantes por su papel transversal en la economía de los países. Este proceso, al parecer, está siendo exitoso en el caso de Estados Unidos, pero todavía falta un mayor esfuerzo en el caso de Canadá y México. Estados Unidos todavía puede ahondar y profundizar el papel de la tecnología para reducir aún más sus emisiones absolutas de CO₂, dado que es uno de los principales países contaminantes a nivel global.

A manera de corolario, este trabajo brinda un análisis comparativo de los cambios estructurales de la economía y su impacto en el medio ambiente, entre las tres economías que integran la región de Norteamérica. Provee información relevante para indagar sobre dinámicas interactivas en sectores específicos de la región. También permite profundizar sobre temas de políticas ambientales de adaptación y mitigación regionales, al mostrar los sectores en los que se ha generado el mayor impacto de cambio de emisiones (positivo o negativo) de CO₂.

Asimismo, se generan futuras líneas de investigación relacionadas a los puntos anteriores, en particular, el análisis del comercio regional en las emisiones de CO₂ de cada país, así como las implicaciones de políticas de transición energética, que como el análisis indicó, guarda una fuerte correlación con el nivel de emisiones.

Referencias

- Alier, J. M., & Roca, J. (2015). *Economía ecológica y política ambiental*. Fondo de Cultura Económica.
- Andreoni, V., & Galmarini, S. (2016). Drivers in CO2 emissions variation: A decomposition analysis for 33 world countries. *Energy*, 103, 27-37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.096>
- Banco Mundial. (3 de abril de 2023). *World Bank national accounts data, and OECD National Accounts data files*. Banco Mundial. Datos. <https://www.worldbank.org/en/home>
- Banco Mundial. (11 de julio de 2023). *World Development Indicators*. Banco Mundial. Datos. <https://databank.worldbank.org/reports.aspx?source=World-Development-Indicators#>
- Casler, S. D., & Rose, A. (1998). Carbon Dioxide Emissions in the U.S. Economy: A Structural Decomposition Analysis. *Environmental and Resource Economics*, 11(3/4), 349-363. DOI: <https://doi.org/10.1023/a:1008224101980>
- Corsatea, T., Lindner, S., Arto, I., Román, M., Rueda-Cantuche, J., Velázquez Afonso, A., .Neuwahl, F. (2019). *World Input-Output Database Environmental Accounts*. Seville (Spain): European Commission.
- Dietzenbacher, E., & Los, B. (1998). Structural Decomposition Techniques: sense and sensitivity. *Economic Systems Research*, 10(4), 307-324. DOI: <https://doi.org/10.1080/09535319800000023>
- González, D., & Martínez, M. (2012). Decomposition analysis of CO2 emissions in the Mexican industrial sector. *Energy for Sustainable Development*, 16(2), 204-205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2012.01.005>
- Kaivo-oja, J. L., Panula-Ontto, J., Vehmas, J., Chen, Y., Mikkonen, S., & Auffermann, B. (2014). Are structural change and modernisation leading to convergence in the CO2 economy? Decomposition analysis of China, EU and USA. *Energy*, 72, 115-125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.015>
- Macías, A. (2015). *Actividad económica y daño ambiental: un análisis estructural para México*. [Tesis de maestría en Economía. Ciudad de México: El Colegio de México]. <https://repositorio.colmex.mx/concern/theses/m613mx88c>
- Miller, R. E., & Blair, P. D. (2009). *Input-output analysis: foundations and extensions*. Cambridge University Press.
- Sesso, P. P., Amâncio-Vieira, S. F., Zapparoli, I. D., & Sesso Filho, U. A. (2020). Structural decomposition of variations of carbon dioxide emissions for the United States, the European Union and BRIC. *Journal of Cleaner Production*, 252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119761>
- Shahbaz, M. G., Adom, P. K., & Hammoudeh, S. (2019). The technical decomposition of carbon emissions and the concerns about FDI and trade openness effects in the United States. *International Economics*, 159, 26-73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inteco.2019.05.001>
- Sheinbaum-Pardo, C., Mora-Pérez, S., & Robles-Morales, G. (2012). Decomposition of energy consumption and CO2 emissions in Mexican manufacturing industries: Trends between 1990 and 2008. *Energy for Sustainable Development*, 16(1), 57-67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.08.003>
- Su, B., & Ang, B. (2012). Structural decomposition analysis applied to energy and emissions: some methodological developments. *Energy Economics*, 1(34), 177-188.
- Talaei, A., Gemechu, E., & Kumar, A. (2020). Key factors affecting greenhouse gas emissions in the Canadian industrial sector: A decomposition analysis. *Journal of Cleaner Production*, 246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119026>
- Timmer, M. P., Dietzenbacher, E., Los, B., Stehrer, R., & De Vries, G. J. (2010). An illustrated user guide to the world input-output database: the case of global automotive production. *Review of International Economics*, 23(3), 575-605. DOI: <https://doi.org/10.1111/roie.12178>

- Vinuya, F., DiFurio, F., & Sandoval, E. (2010). A decomposition analysis of CO₂ emissions in the United States. *Applied Economics Letters*, 17(10), 925-931. DOI: <https://doi.org/10.1080/00036840902762688>
- Wang, H., Ang, B. W., & Su, B. (2017). A Multi-region Structural Decomposition Analysis of Global CO₂ Emission Intensity. *Ecological Economics*, 142, 163-176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.023>