

Emisión de gases de efecto invernadero
en la economía mexicana
y políticas de mitigación,
2020-2030*

Greenhouse gas emissions
in the Mexican economy
and mitigation policies,
2020-2030

*Pablo Ruiz Nápoles, Javier Castañeda León
y Eduardo Moreno Reyes***

ABSTRACT

In this paper, we built an input-output environmental model for the Mexican economy to estimate the greenhouse gas (GHG) emissions produced by this economy to the year 2030 and to explore the possibilities for their reduction. The model shows how innovative technologies applied in selected subsectors of the economy might reduce total emissions, through their direct and indirect effects on other sectors. We used the model to calculate two trajectories: one called “business as usual” and another that results from simulating a technological change in selected sectors. We conclude from the results that technological change, even limited to a few sectors, tends to produce important beneficial effects in terms of GHG reduction.

* Artículo recibido el 24 de julio de 2022 y aceptado el 14 de octubre de 2022. Los autores agradecen el apoyo del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), número IN311720. Este trabajo fue realizado en la Facultad de Economía de la UNAM en 2020 y 2021. Los contenidos del artículo son responsabilidad exclusiva de los autores.

** Pablo Ruiz Nápoles, Facultad de Economía, UNAM (correo electrónico: ruizna@unam.mx). Javier Castañeda León, UNAM (correo electrónico: calj07@hotmail.com). Eduardo Moreno Reyes, UNAM (correo electrónico: moredu@unam.mx).

Keywords: Greenhouse gases; input-output; technological change. *JEL codes:* C67, O13, O33.

RESUMEN

En este trabajo desarrollamos un modelo de insumo-producto medioambiental para la economía mexicana con el fin de explorar qué tanto es posible reducir la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) en la economía para 2030. El modelo muestra cómo nuevas tecnologías aplicadas en subsectores seleccionados de la economía reducen las emisiones totales y estima los impactos de tales tecnologías en las emisiones anuales de GEI hasta 2030. Utilizamos esta metodología con el propósito de estimar dos trayectorias: una a la que llamamos “base” y otra que resulta de simular un cambio tecnológico en las ramas seleccionadas. A partir de los resultados, concluimos que el cambio tecnológico, aun limitado a unas cuantas ramas, tiende a producir efectos benéficos importantes en materia de reducción de GEI.

Palabras clave: gases de efecto invernadero; insumo-producto; cambio tecnológico. *Clasificación JEL:* C67, O13, O33.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo es continuación de otros anteriores (Ruiz Nápoles, 2011, 2012, 2014a, 2014c; Ruiz-Nápoles, Castañeda León y Moreno Reyes, 2017); utiliza un modelo de insumo-producto medioambiental a fin de detectar sectores productivos altamente generadores de gases de efecto invernadero (GEI) que deben ser objeto de atención especial de las autoridades gubernamentales para la aplicación de políticas de mitigación ante el calentamiento global, el cual ha empezado a producirse ya como resultado del cambio climático.

Las siguientes páginas se refieren a la economía mexicana en su etapa más reciente. Con el modelo de insumo-producto medioambiental se detectan los sectores altamente emisores de GEI en México; se alimenta con la información de fuentes oficiales. Con tales datos se pronostican las emisiones de GEI por sector económico de 2018 a 2030, con el supuesto de que no haya ningún cambio tecnológico en sector alguno de la economía. De manera alternativa a esta trayectoria, se simula la adopción en la economía mexicana de técnicas de producción de sectores seleccionados de la economía canadiense

con base en datos comparables de ambas economías y se pronostica la tendencia de las emisiones de GEI de 2018 a 2030, a fin de comparar con la trayectoria base y obtener algunas conclusiones que puedan servir como criterios para seguir políticas de mitigación consistentes con las recomendaciones de la Organización de las Naciones Unidas (onu).

El trabajo está dividido en cinco secciones aparte de esta introducción. En la sección I se ubica el problema general del calentamiento global, los gases de efecto invernadero y su situación actual. En la sección II se aborda el problema del cambio tecnológico como política de mitigación. En la sección III se presenta el modelo de insumo-producto medioambiental para México. En la sección IV se analizan los resultados de la aplicación del modelo. Por último, la sección V se dedica a las conclusiones y las recomendaciones.

I. CALENTAMIENTO GLOBAL, CAMBIO CLIMÁTICO Y POLÍTICA DE MITIGACIÓN

Desde que se registró por vez primera el calentamiento global en 1985 (Organización Meteorológica Mundial [OMM], 1985), se evidenció que el origen del fenómeno era de larga data, producido por las concentraciones atmosféricas de los llamados gases de efecto invernadero. Los gases que producen este efecto son varios: el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido de nitrógeno (N_2O) y los hidrofluorocarbonos (HFC). Todos ellos existen naturalmente, pero son producidos también por las actividades humanas, en especial aquellas que implican la quema de combustibles fósiles. El cambio climático consiste en el incremento gradual en la temperatura del planeta, el incremento en el nivel del mar y el cambio en los patrones de lluvia, así como en la frecuencia, la magnitud y la intensidad de eventos de clima extremo, como sequías e inundaciones.

El Panel Intergubernamental del Cambio Climático (ipcc), creado en 1988 por la OMM y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) (ipcc, 2011), ha establecido reglas para la medición de estas emisiones en todos los países miembros de la onu, y ha estado recopilando información, convocando reuniones de países —las llamadas Conference of Parties (cop)—, buscando lograr acuerdos y recomendando políticas a seguir para enfrentar el problema. Según los expertos del ipcc (1996, 2001, 2007 y 2011), hay dos grandes tipos de políticas a seguir: las de mitigación y las de adaptación. La miti-

gación se ha definido como: “el cambio tecnológico y la sustitución que reduce insumos y emisiones por unidad de producto” (IPCC, 2007: 84).

Todos los factores que provocan la quema de combustibles se relacionan de un modo u otro con la actividad económica, entendida ésta en un sentido amplio: la producción, el comercio y el consumo. A fin de diseñar un escenario de mitigación, es necesario identificar aquellos sectores productivos que generan emisiones de GEI.

1. Situación actual

Como puede apreciarse en el cuadro 1, China, los Estados Unidos, la India, Rusia y Japón fueron los cinco países con más grandes emisiones en 2020. Desde hace muchos años, éstos han ocupado los mismos lugares. Ellos firmaron con los demás asistentes a la COP de 2015 el Acuerdo de París (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático [UNFCCC], 2015), y confirmaron el año siguiente cartas llamadas “Contribución Determinada a Nivel Nacional” (UNFCCC, 2016), en las que cada uno se comprometía a metas de reducción anual de emisiones para 2025 (Ruiz-Nápoles et al., 2017). La salida de dicho acuerdo por parte de los Estados Unidos en 2017 comprometió el cumplimiento de los pactos y los compromisos de los países firmantes derivados del acuerdo, en especial de los mayores emisores. Así, las emisiones de GEI han seguido creciendo, aunque hubo descensos en éstas en muchos países en 2020, ello se derivó de la pandemia de covid-19, que afectó fuertemente a todas las economías.

También en el cuadro 1 podemos apreciar que México ocupa el lugar 14 en emisiones absolutas de GEI y que representa 9% de las emisiones de los Estados Unidos, nuestro vecino del norte.

2. Emisiones de GEI en México por sector, 2018

Como en otros trabajos desarrollados sobre el tema, utilizamos el análisis estructural o de insumo-producto (Cumberland y Stram, 1976). Un primer paso en este tipo de análisis es la identificación de los sectores económicos contaminantes, la cual resulta crucial a fin de estimar los efectos de la contaminación (Leontief, 1970; Aroche, 2000; Lenzen, Pade y Munksgaard, 2004; Munksgaard, Wier, Lenzen y Dey, 2005). En este caso nos referimos específicamente a la emisión de GEI.

CUADRO 1. *Emisiones de GEI en países seleccionados, 2017 y 2020*

País	Emisiones de 2017		Emisiones de 2020		Población (miles)
	Total	Per cápita	Total	Per cápita	
	Tm CO ₂ eq.	Kg CO ₂ eq.	Tm CO ₂ eq.	Kg CO ₂ eq.	
1 China	10877.2	7.7	11680.4	8.2	1448471.4
2 Estados Unidos	5107.4	15.7	4535.3	13.68	334805.3
3 India	2454.8	1.8	2411.7	1.74	1406631.8
4 Rusia	1764.9	12.3	1674.2	11.64	145805.9
5 Japón	1320.8	10.4	1061.8	8.39	125584.8
6 Irán	671.5	8.3	690.2	8.26	86022.8
7 Alemania	796.5	9.7	636.9	7.72	83883.6
8 Corea del Sur	673.3	13.2	621.5	12.07	51329.9
9 Arabia Saudita	638.8	19.4	588.8	16.96	35844.9
10 Indonesia	511.3	1.9	568.3	2.09	279134.5
11 Canadá	617.3	16.9	542.8	14.43	38388.4
12 Brasil	492.8	2.4	451.8	2.11	215353.6
13 Sudáfrica	467.7	8.2	435.1	7.41	60756.1
14 México	507.2	3.9	407.7	3.05	131562.8
15 Turquía	429.6	5.3	405.2	4.83	85562.0

FUENTE: datos de World Population Review (2022).

Las agencias de medio ambiente de los distintos países siguen la metodología de recopilación de emisiones anuales del IPCC, la cual requiere adaptaciones particulares para clasificar las emisiones por fuentes sectoriales de la economía de manera consistente con las cuentas nacionales. Esto tiene el fin de que las emisiones de GEI en la producción y la circulación de mercancías y servicios puedan analizarse de manera desagregada por sector económico. Este último (*industry* en inglés) se refiere a un grupo de empresas que produce un mismo bien o se dedica a una misma actividad.

Así se hizo para clasificar las emisiones absolutas de GEI en México, mediante el Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN), como se muestra en el cuadro 2, que se refiere al conjunto de sectores que conforman los principales emisores en 2018. Se trata de 10 subsectores de los 79 de la clasificación SCIAN que concentran dos terceras partes de las emisiones totales

CUADRO 2. *Emissiones de GEI en México, 2018 (subsectores principales)*

<i>Núm.</i>	<i>Subsector</i>	<i>Gg CO₂ eq.</i>	<i>Porcentaje del total</i>
9	Generación, transmisión y distribución de energía eléctrica	97 690.1	17.1
1	Agricultura	75 456.7	13.2
2	Cría y explotación de animales	68 384.0	12.0
26	Fabricación de productos con base en minerales no metálicos	31 496.3	5.5
10	Suministro de agua y suministro de gas por ductos al consumidor	24 819.9	4.4
23	Fabricación de productos derivados del petróleo y del carbón	24 641.9	4.3
40	Autotransporte de carga	17 671.6	3.1
76	Servicios personales	14 828.8	2.6
37	Transporte aéreo	14 424.7	2.5
41	Transporte terrestre de pasajeros, excepto por ferrocarril	13 275.3	2.3
	<i>Subtotal</i>	382 689.1	67.2
	<i>Total de 79 subsectores</i>	569 873.7	100.0

FUENTE: elaboración propia con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat).

de GEI. Destaca por supuesto la generación de energía eléctrica, actividad que emitió 17% del total de GEI en 2018.

Se ha considerado importante por parte de organismos internacionales medir las emisiones de GEI por unidad de producto. En México hemos identificado 10 subsectores de la economía mexicana con los coeficientes más altos de emisión, como aparecen en el cuadro 3.

II. EL CAMBIO TECNOLÓGICO COMO POLÍTICA DE MITIGACIÓN

En la esfera de la producción, las políticas de mitigación se centran en la introducción de tecnologías de reducción o abatimiento de la emisión de GEI o bien en su captura (*sinks*). Estas tecnologías son específicas para cada sector. Es decir, la definición de sector económico como grupo de empresas que producen más o menos el mismo bien o servicio y se supone que comparten la misma tecnología.

Una de las tecnologías de reducción de GEI es la que implica un cambio importante en el proceso de producción del bien o servicio de que se trate.

CUADRO 3. *Coefficientes de GEI por unidad de producto*

Núm.	Subsector	GEI	VBP	Coefficiente
		Gg CO ₂ eq.	Millones de pesos	(3) =
		(1)	(2)	(1)/(2)
10	Suministro de agua y suministro de gas por ductos al consumidor final	24 819.9	131 112.6	0.189
9	Generación, transmisión y distribución de energía eléctrica	97 690.1	603 223.7	0.162
2	Cría y explotación de animales	68 384.0	498 329.2	0.137
4	Pesca, caza y captura	4 529.6	33 013.8	0.137
42	Transporte por ductos	3 424.0	26 124.5	0.131
3	Aprovechamiento forestal	3 958.2	31 881.7	0.124
1	Agricultura	75 456.7	669 842.0	0.113
5	Servicios relacionados con las actividades agropecuarias y forestales	589.7	6 197.2	0.095
39	Transporte por agua	2 927.2	32 226.1	0.091
26	Fabricación de productos a base de minerales no metálicos	31 496.3	364 808.3	0.086
	<i>Total de subsectores seleccionados</i>	313 275.6	2 396 759.3	0.131

FUENTE: elaboración propia con datos del INEGI, y del INECC, Semarnat.

Es aquí donde el análisis de insumo-producto es particularmente útil, ya que los coeficientes técnicos que se derivan de la matriz de insumo-producto (MIP) reflejan la técnica de producción de cada sector en su relación con todos los demás que componen la estructura económica de un país en un periodo dado. En otras palabras, cada vector de insumos en la MIP representa una tecnología determinada en la producción de un tipo de bien o servicio, de modo que la introducción de una tecnología que reduce las emisiones de GEI en la producción de un bien o servicio implica una modificación de su vector de coeficientes técnicos.

Desde una perspectiva rigurosa, el cambio tecnológico requerido para reducir las emisiones de GEI en la producción debería inducirse en todos los procesos que implican altas emisiones absolutas o relativas de GEI a fin de abatir o reducir las emisiones. Hasta ahora el cambio tecnológico en el que se ha puesto más énfasis en varias partes del mundo es el asociado con el sector de la energía eléctrica, cuya generación en muchos países descansa principalmente en la quema de combustibles fósiles, sea carbón, gas o combustóleo.

Ello ha dado lugar a la introducción, como principal alternativa de política de mitigación, de las llamadas energías renovables o limpias, particularmente la energía solar, la eólica y la que producen los biocarburantes. No se incluye la energía nuclear que se usa en varios países. Debido a que es un sector clave por sus relaciones con todos los sectores económicos, es sin duda el prioritario para un cambio tecnológico en el sentido antes expuesto, pero no es suficiente, se requieren cambios del mismo tipo en otros sectores.

A lo largo de los años se han intentado inducir distintos cambios tecnológicos para los diferentes sectores productivos y de servicios orientados específicamente a la reducción o el abatimiento de la emisión de GEI en muchos países del mundo. Sin embargo, hay dos cuestiones que no han sido totalmente resueltas en muchos casos y que dificultan la aplicación de tales cambios. La primera es su efectividad en la práctica y la segunda es el costo de su implementación. Ambos problemas convergen en que los proyectos no resultan rentables en el mediano plazo para los propietarios de las empresas en las que se requiere su aplicación. Las políticas de mercado aplicadas en varios países no han resultado efectivas en esa dirección.

El problema del cambio climático fue definido por Nicholas Stern, como “la falla de mercado más grande que se haya visto” (Stern, 2007). Esto sin duda significa que la naturaleza del problema impide que los mecanismos del mercado por sí solos puedan resolverlo. Entre las dificultades que se encuentran hay una amplia serie de imperfecciones de mercado que proliferan en todas las economías del mundo, grandes y pequeñas (Duval, 2008; Stiglitz, 1991). Otra dificultad no menos importante es que, en la práctica, las innovaciones tecnológicas orientadas a reducir la contaminación sólo ocurren cuando el Estado participa activamente en su promoción (Haščič, Johnstone, Watson y Kaminkeret, 2010). Finalmente, está el problema de la distribución desigual de los costos de la mitigación, que crea o acentúa desigualdades preexistentes dentro de o entre regiones y países, que obliga a la acción de los Estados para prevenirlas o compensarlas (Ruiz Nápoles, 2014b; Hepburn, 2010).

1. Cambios tecnológicos en la MIP de México

Sin soslayar la importante discusión arriba señalada, lo que intentamos en nuestro modelo es analizar la viabilidad de introducir en la economía mexi-

cana cambios tecnológicos en sectores seleccionados con tecnologías que en otro país generan, en la práctica, menos emisiones por unidad de producto. Ello con el fin de reducir las emisiones de tales sectores en su producción nacional y que estos mismos puedan influir, directa o indirectamente, en otros para la reducción de emisiones de GEI por sus relaciones intraindustriales, las cuales llamamos y medimos como “encadenamientos”.

El modelo de insumo-producto que utilizamos tiene como base la MIP de México para 2018 en pesos a precios corrientes, estimada por el grupo de investigación del INEGI. Utilizamos también información de esta fuente y del INECC a fin de proyectar las emisiones anuales de GEI por subsector hacia 2030 en una trayectoria base (*business as usual*).

Con el propósito de simular un escenario alternativo de emisiones de GEI proyectadas con base en cambios tecnológicos, usamos la matriz de coeficientes técnicos correspondiente, la cual modificamos a partir de una selección de tecnologías más eficientes que existen en Canadá. Hicimos una tabla comparativa (cuadro 4) para seleccionar las tecnologías que es más viable adaptar en México.

2. Sectores clave

En el análisis de insumo-producto se denomina sectores clave (*key sectors*) a aquellos que tienen efectos importantes en los demás, sea mediante la demanda o la oferta. Estas relaciones se conocen como encadenamientos (*linkages*) entre sectores. Así, tenemos encadenamientos hacia delante o de oferta y encadenamientos hacia atrás o de demanda. Los sectores que tienen más encadenamientos hacia atrás y hacia delante son considerados *clave*, porque su producción afecta la de otros sectores por la demanda y la oferta. Para medir estos encadenamientos, utilizamos los índices ampliamente conocidos de Rasmussen (Miller y Blair, 2009: 555).

Rasmussen (1957) definió dos índices o coeficientes, uno de demanda mediante la matriz inversa de Leontief y otro de oferta con la matriz de distribución o de Ghosh. El primero mide los encadenamientos hacia atrás y el segundo los encadenamientos hacia delante de cada uno de los sectores que componen la matriz.

En el cuadro 5 se muestran los resultados de la estimación de encadenamientos hacia atrás y hacia delante ordenados en ambos casos con los sectores con coeficientes más altos.

CUADRO 4. *Emisiones de GEI por unidad de producto en México y Canadá, 2018*

Núm.	Subsector	México			Canadá			Diferencias coef.	
		GEI	VBP	Coef.	GEI	VBP	Coef.	Abs.	Rel. ^a
10	Suministro de agua y de gas por ductos	24 820	131 113	0.189	2 656	112 977	0.024	0.166	0.88
9	Energía eléctrica	97 690	603 224	0.162	70 652	779 786	0.091	0.071	0.44
42	Transporte por ductos	3 424	26 125	0.131	9 917	204 533	0.048	0.083	0.63
3	Aprovechamiento forestal	3 958	31 882	0.124	6 754	182 007	0.037	0.087	0.70
26	Productos de minerales no metálicos	31 496	364 808	0.086	14 631	273 604	0.053	0.033	0.38

^a Dif. Rel. = Dif. Abs./Coef. Méx.

FUENTE: elaboración propia con datos del INEGI, el INECC y Statistics Canada.

CUADRO 5. *Encadenamientos de subsectores seleccionados en México, 2018*

Núm.	Subsector	Coeficientes de Rasmussen	
		Hacia atrás	Hacia delante
3	Aprovechamiento forestal	0.7450	1.7432
9	Generación, transmisión y distribución de energía eléctrica	0.9518	1.2189
10	Suministro de agua y suministro de gas por ductos	0.9392	0.9546
26	Fabricación de productos a base de minerales no metálicos	1.2527	1.0869
42	Transporte por ductos	1.0201	2.6190

FUENTE: elaboración propia con datos de la MIP.

III. MODELO DE INSUMO-PRODUCTO MEDIOAMBIENTAL PARA MÉXICO

1. *Objetivos y supuestos del modelo*

El propósito central del modelo es determinar en qué ramas o sectores de la economía es viable realizar un cambio de tecnología a fin de reducir la emisión total de GEI y medir los efectos de este cambio tecnológico para 2030, de manera similar a como se ha hecho en trabajos anteriores (Ruiz Nápoles, 2012, 2014a y 2014c; Ruiz-Nápoles et al., 2017).

El modelo supone la aplicación de un conjunto de tecnologías reductoras en cinco subsectores de la economía mexicana y estima su efectividad para

reducir las emisiones totales de GEI. El escenario alternativo supuesto es el de trayectoria base (*business as usual*), que implica la ausencia de cambio tecnológico.

Se toman como tasas de crecimiento del producto interno bruto (PIB) real de la economía mexicana las registradas por agencias oficiales entre 2018 y 2020 y los pronósticos de organismos internacionales como la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) de 2020 a 2030.

Los cinco subsectores de la MIP de México escogidos para simular este cambio tecnológico fueron: (3) aprovechamiento forestal, (9) energía eléctrica, (10) suministro de agua y gas por ductos, (26) fabricación de productos minerales no metálicos y (42) transporte por ductos.

Como puede apreciarse en el cuadro 5, de los subsectores seleccionados, dos —(26) y (42)— poseen altos encadenamientos hacia delante y hacia atrás; dos subsectores —(3) y (9)— tienen altos encadenamientos hacia delante y moderados hacia atrás, y sólo en un subsector —(10)— el índice queda ligeramente debajo de uno (1) en ambos sentidos.

La selección de estos cinco subsectores para el modelo de simulación obedece a dos criterios fundamentales: uno, tienen coeficientes de emisión de GEI por unidad de producto altos, y, segundo, pudimos compararlos de manera precisa con los subsectores correspondientes de la economía de Canadá (Statistics Canada, 2021) gracias al sistema de clasificación SCIAN, que también usa el INEGI de México y que cuenta con información de emisiones de GEI en Canadá con la misma clasificación (véase el cuadro 4).

Para cada uno de estos cinco subsectores se analizó cuidadosamente el contenido de actividades que lo componen en clasificación SCIAN (INEGI, 2021) para México, lo que se tomó en cuenta para conocer su adaptabilidad a una tecnología proveniente de otro país.

El procedimiento de introducción de esos cambios se facilitó también porque se contó con la MIP de Canadá para 2018, de la cual se obtuvo la matriz de coeficientes técnicos correspondiente.

2. El modelo

Partimos de la solución usual del modelo de insumo-producto:

$$x_t = (I - A_t)^{-1} y_t \quad (1)$$

donde x_t es la producción bruta medida en términos económicos en el tiempo t ; A_t representa la matriz de coeficientes técnicos de México en el tiempo base $t=2018$; y_t corresponde al vector de demanda final o PIB en el tiempo t , y t va de 2018 a 2030.

Introducimos ahora la ecuación de la emisión de GEI como subproducto:

$$x^p_t = \hat{e} x_t \quad (2)$$

donde x^p_t corresponde al vector de emisiones de GEI medido en unidades de CO₂ equivalente; \hat{e} es la matriz diagonal de emisiones de GEI por unidad de producto x , y t representa los años de pronóstico.

Al combinar las ecuaciones (1) y (2), obtenemos:

$$x^p_t = \hat{e}(I - A_t)^{-1}y_t \quad (3)$$

$$x^p_t = \hat{e}^+(I - A^+_t)^{-1}y_t \quad (4)$$

donde: A^+_t equivale a la matriz estimada modificada con nuevas tecnologías en los cinco subsectores seleccionados, representadas como vectores nuevos en la matriz A^+ .

La idea central es estimar diferencias absolutas y relativas entre las variables $x^p_{t=2018}$ y $x^p_{t=2030}$, es decir, los niveles de emisiones de GEI entre el año base y el año final, con tasas de crecimiento anual del PIB $g_y = \Delta y_t / y_{t-1}$ previamente definidas.

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el cuadro 6 y la gráfica 1 se muestran los resultados de la aplicación del modelo con dos trayectorias y con supuestos diferentes:

1. *Trayectoria base*

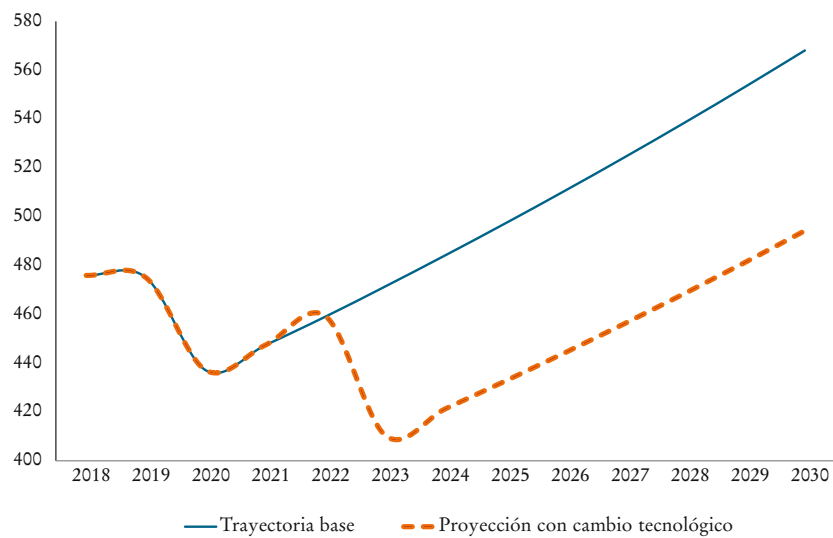
Esta trayectoria nos muestra qué pasaría con las emisiones de GEI si no hubiera cambios tecnológicos introducidos en la producción de 2018 a 2030. Como se aprecia en el cuadro 6, se espera que haya un incremento entre 2018 y 2030 en las emisiones de GEI en México de cerca de 20%. Tal aumento está directamente asociado en nuestro modelo con el incremento de la pro-

CUADRO 6. Emisiones de GEI para México, 2018-2030 (Gg de CO₂ equivalente)

Año	Trayectoria base	Simulación	Reducción
2018	569 873.7	569 873.7	
2019	568 734.0	568 734.0	
2020	523 235.2	523 235.2	
2021	535 792.9	535 792.9	
2022	549 723.5	549 723.5	
2023	564 566.0	476 226.3	88 339.7
2024	579 809.3	489 084.4	90 724.9
2025	595 464.2	502 289.7	93 174.5
2026	611 541.7	515 851.5	95 690.2
2027	628 053.3	529 779.5	98 273.8
2028	645 010.8	544 083.5	100 927.2
2029	662 426.1	558 773.8	103 652.3
2030	680 311.6	573 860.7	106 450.9
Var. 30 – 18	110 437.9	3 987.0	
Var. 30/18	19.4	0.7	

FUENTE: resultados del modelo.

GRÁFICA 1. Proyección de emisiones de GEI para México, 2018-2030 (Gg CO₂ eq.)



FUENTE: elaboración propia.

ducción bruta, que obedece en el modelo de Leontief a aumentos en la demanda final equivalente al PIB en las cuentas nacionales. Puede apreciarse que esta trayectoria, desde luego lineal como el modelo mismo, presenta un quiebre en 2020, como resultado de la crisis económica derivada de la pandemia. El pronóstico para 2022 sigue siendo el que supusimos al inicio del trabajo, según las fuentes consultadas.

2. *Trayectoria de emisiones GEI con cambio tecnológico simulado*

Esta trayectoria se aprecia también en el cuadro 6 y la gráfica 1. En ella puede observarse una reducción sistemática del total de emisiones a partir de 2023; aquí estamos suponiendo que los cambios tecnológicos ocurrirían en 2020 y se tardarían en dar resultados visibles tres años, así que la tendencia a seguir es la misma que la línea base hasta 2023, cuando experimenta un quiebre y reinicia su tendencia creciente hasta 2030 en un nivel inferior a la trayectoria base, debido a las modificaciones introducidas en la estructura de la matriz por el cambio tecnológico en los cinco sectores ya mencionados. Las emisiones totales en esta trayectoria alcanzan un nivel en 2030 de 0.7% inferior al de 2018.

Debe señalarse que, aunque en su mayoría los datos que aquí se utilizan podrían llamarse datos *duros*, ya que provienen de registros oficiales y están sujetos a verificación, los resultantes datos *pronosticados* y las simulaciones indican solamente tendencias, sujetas a determinados supuestos, y no constituyen datos reales. Esto es válido para cualquier modelo que interpreta y proyecta la realidad económica, aunque no siempre se explicita.

Sin embargo, esta simulación nos permite concluir que un cambio tecnológico, moderado en varios sentidos, reduce de manera significativa la generación de emisiones de GEI en la esfera productiva.

3. *Cambios en las emisiones de GEI por subsector*

Otra de las ventajas importantes del análisis de insumo-producto es que se trata de un estudio sectorial de la economía. Es decir, podemos evaluar los resultados de los pronósticos realizados a nivel de subsector en este caso. Éstos se muestran en el cuadro 7 para un grupo seleccionado de subsectores que combinan aquellos cinco para los que se supuso el cambio tecnológico —subsectores (3), (9), (10), (26) y (42)—, así como otros siete subsectores,

CUADRO 7. Variaciones de las emisiones de GEI en sectores seleccionados, 2018-2030

Núm.	Subsector	Año base	Trayectoria base				Trayectoria con cambio tecnológico		
			Gg CO ₂ eq.		Var./2018		Gg CO ₂ eq.		Var./2018
			2018	2030	Abs.	Rel.	2030	Abs.	Rel.
1	Agricultura	75 457	90 080	14 623	19.4	90 141	14 684	19.5	
2	Cría y explotación de animales	68 384	81 636	13 252	19.4	81 657	13 273	19.4	
3	Aprovechamiento forestal	3 958	4 725	767	19.4	1 488	-2 470	-62.4	
9	Energía eléctrica	97 690	116 622	18 932	19.4	59 925	-37 765	-38.7	
10	Suministro de agua y de gas por ductos	24 820	29 630	4 810	19.4	3 663	-21 157	-85.2	
23	Productos derivados del petróleo	24 642	29 417	4 775	19.4	25 925	1 283	5.2	
26	Productos de minerales no metálicos	31 496	37 600	6 104	19.4	24 430	-7 067	-22.4	
37	Transporte aéreo	14 425	17 220	2 795	19.4	17 143	2 719	18.8	
40	Autotransporte de carga	17 672	21 096	3 425	19.4	21 255	3 583	20.3	
41	Transporte terrestre de pasajeros	13 275	15 848	2 573	19.4	15 945	2 670	20.1	
42	Transporte por ductos	3 424	4 088	664	19.4	1 562	-1 862	-54.4	
76	Servicios personales	14 829	17 703	2 874	19.4	17 720	2 891	19.5	
	Subtotal	390 071	465 665	75 593	19.4	316 403	-73 668	-18.9	
	Total de 79 subsectores	569 874	680 312	110 438	19.4	573 861	3 987	0.7	

FUENTE: elaboración propia con datos del INEGI y resultados del modelo.

en este caso altamente emisores no añadidos en el grupo original de cambio tecnológico: (1) agricultura, (2) ganadería, (23) productos derivados del petróleo, (37) transporte aéreo, (40) autotransporte de carga, (41) transporte terrestre de pasajeros y (76) servicios personales. Este grupo de subsectores representa 69% del total de las emisiones de GEI producidas por la economía mexicana en 2018.

Los resultados indican que, al seguir la trayectoria base, todos estos subsectores incrementan sus emisiones en 19.4% en 2018-2030. En el caso de la trayectoria con cambio tecnológico en cinco sectores, éstos —(3), (9), (10),

(26) y (42)— presentan variaciones negativas en las emisiones de GEI de 2030 respecto a las de 2018, y otros seis subsectores —(1), (2), (37), (40), (41) y (76)— no cambian significativamente su tendencia respecto de la trayectoria base. En el caso del subsector (23), productos derivados del petróleo, disminuye su tasa de crecimiento a 5% en el mismo periodo, que es menor a la trayectoria base de 19.4%. En conjunto, los 12 subsectores considerados reducen sus emisiones en el periodo de análisis en 18.9 por ciento.

La razón por la cual los subsectores altamente emisores de GEI que no experimentan un cambio tecnológico simulado no cambian su tendencia al crecimiento de las emisiones es que, salvo un caso, ninguno se ve influido por los subsectores que sí experimentan el cambio. Ello muestra que sus encadenamientos no son suficientemente grandes para influir en estos otros grandes emisores.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De la revisión bibliográfica que hemos hecho, del estudio de simulación que se presenta, así como de los anteriores artículos sobre el tema (Ruiz Nápoles, 2011, 2012, 2014a y 2014c; Ruiz-Nápoles et al., 2017), es posible extraer algunas conclusiones esenciales para la discusión:

1. Desde el trabajo fundamental de Nicholas Stern (2007), ha quedado claro que el problema del calentamiento global por emisiones de GEI es mundial. Esto implica que todos los países están involucrados en él y que la solución sólo es posible si las políticas de mitigación son acordadas por todos, especialmente los países más contaminantes. Asimismo, que las políticas a aplicar deben estar coordinadas entre países. Para ello se requiere llegar a acuerdos y negociaciones internacionales. Otro sentido de la globalidad del problema es que la generación de GEI no atañe exclusivamente a la producción, sino que también al consumo de manera importante, sobre lo cual hay pocos estudios.

2. Respecto de la producción, hemos podido ver que el crecimiento económico, por mínimo que sea, genera emisiones de GEI en prácticamente todos los sectores de la economía de manera directa o indirecta. De modo que el cambio tecnológico debe ser transversal a todos los sectores productivos. Ahora bien, el cambio tecnológico requerido para reducir o eliminar las emisiones de GEI es particular para cada sector. Por ejemplo, la actividad llamada aprovechamiento forestal se refiere a la tala de bosques, los cuales se

consideran sumideros (*sinks*) de CO₂, de modo que la política a seguir consiste en plantar más árboles de los que se talan. Canadá tuvo excelentes resultados en la recuperación de bosques, de modo que ese sector en tal país dejó de ser gran emisor para convertirse en gran receptor de CO₂.

De cualquier modo, algunas grandes resistencias de los países para firmar acuerdos que impliquen reducciones a las emisiones provienen de sentir que no pueden dejar de crecer económicamente y que, además, no es rentable cambiar de tecnología. Así, deben transferirse las tecnologías ahorradoras de emisiones a bajo costo entre países, y acelerarse los recursos financieros para apoyar a las economías más débiles.

3. Otra consideración derivada de los trabajos de Stern (2007), Haščič et al. (2010), Stiglitz (1991) y otros no referidos aquí es que, puesto que políticas de mercado seguidas en varios países durante años han mostrado ser ineficaces para disminuir la emisión de GEI, es necesario que el Estado muestre un mayor grado de intervención, especialmente en lo que se refiere a fuentes de energía y sumideros (*sinks*). El caso de Canadá en los bosques y el de la ciudad de Chicago en el transporte público son muestras de que sólo desde una acción decidida de las autoridades gubernamentales pueden hacerse efectivas las políticas de reducción significativa de GEI.

4. A nivel regional, México está fuertemente vinculado con la economía de los Estados Unidos, país que ocupa el segundo lugar mundial en emisiones absolutas de GEI y el primero en emisiones per cápita. En el caso de México la dependencia tecnológica respecto de los Estados Unidos es extremadamente fuerte. El nuevo tratado de libre comercio de América del Norte (TMEC) incluye dos capítulos que en su versión anterior no tenía, el laboral y el ambiental, lo que obliga a las empresas establecidas en México, incluyendo a las nacionales, a seguir reglas similares a las de los Estados Unidos. De modo que, si este último cambia sus reglas ambientales por unas más estrictas, México estaría obligado a adoptarlas.

5. Todas estas consideraciones globales y regionales sólo indican que, haga lo que haga México, no tiene una repercusión significativa en la solución del problema. No obstante, no puede permanecer ajeno a los debates internacionales y a los esfuerzos que puedan hacerse en el tema. Es menester que, de manera adecuada y con una orientación clara, se ataque el problema de la emisión de GEI en México en la producción y en el consumo, desde una óptica de política de Estado, mediante los instrumentos de política económica.

Cada sector requiere una política industrial específica. En el caso de las empresas y organismos del Estado, como Pemex y la Comisión Federal de Electricidad (CFE), es claro que debe haber un cambio tecnológico ordenado, que no altere las tarifas que paga el consumidor, a fin de no generar inflación directa o indirecta. El tema de aprovechamiento forestal requiere también una intervención del Estado no sólo para sancionar a los taladores, sino en algunos casos también para ofrecer alternativas a poblaciones rurales que por varias razones se dedican a la tala inmoderada de bosques. Para otros sectores industriales que generan directa o indirectamente GEI, debe haber una política de regulación más estricta con compromisos de corto, mediano y largo plazos, que implique estímulos y sanciones de tipo fiscal para que los empresarios de estos sectores se vean obligados a realizar los cambios tecnológicos requeridos en un plazo razonable. Una rama importante en este caso es la industria automotriz, que directamente no genera alto nivel de emisiones, pero sí el transporte que fabrica, el cual produce una gran emisión de GEI en otros sectores y en los consumidores, de modo que requiere mayor regulación y estímulos a fin de que modifique ya no su tecnología sino el producto mismo que se fabrica. Es un gran cambio que no puede ocurrir de la noche a la mañana, pero es necesario que haya un programa orientado en esa dirección.

En general, el Estado debe utilizar los instrumentos de política industrial que tiene a la mano con una orientación de desarrollo sustentable. Estos instrumentos de política son básicamente tres: la política monetaria referida al crédito, la política comercial referida a importaciones y exportaciones, y la política fiscal, tanto en gasto público (subsidios) como en ingresos (impuestos). La clave del éxito de estas políticas es la coordinación entre las tres.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aroche, F. (2000). *Reformas estructurales y composición de las emisiones contaminantes industriales. Resultados para México*. Santiago de Chile: CEPAL.
- Cumberland, J. H., y Stram, B. (1976). Empirical application of input-output models to environmental problems. En K. Polenske y J. V. Skolka (eds.), *Advances in Input-Output Analysis. Proceedings of the Sixth International Conferences on Input-Output Techniques, Vienna, April, 1974* (pp. 365-382). Cambridge, Mass.: Ballinger.

- Duval, R. (2008). *A Taxonomy of Instruments to Reduce Greenhouse Gas Emissions and their Interactions* (OECD Economics Department Working Papers, 636). París: OECD Publishing. Recuperado de: <https://doi.org/10.1787/236846121450>
- Haščić, I., Johnstone, N., Watson, F., y Kaminkeret, C. (2010). *Climate Policy and Technological Innovation and Transfer: An Overview of Trends and Recent Empirical Result* (OECD Economics Department Working Papers, 30). París: OECD Publishing. Recuperado de: <https://doi.org/10.1787/5km33bnggcd0-en>
- Hepburn, C. (2010). Environmental policy, government, and the market. *Oxford Review of Economic Policy*, 26(2), 117-136. Recuperado de: <https://doi.org/10.1093/oxrep/grq016>
- INECC (2020). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero. Recuperado de: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero-inegycei>
- INEGI (2021). Estadísticas económicas. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825051693>
- IPCC (1996). *Technologies, Policies and Measures for Mitigating Climate Change* (Technical Paper I). Ginebra: OMM/UNEP.
- IPCC (2000). *Special Report Emissions Scenarios* (IPCC Working Group III). Ginebra: IPCC.
- IPCC (2001). 7. Costing Methodologies. En *Climate Change 2001: Mitigation* (pp. 451-498). Accra, Ghana: IPCC.
- IPCC (2007). Contribution of Working Groups I, II and III. En R. K. Pachauri y A. Reisinger (eds.), *Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR4)*. Ginebra: IPCC.
- IPCC (2011). History of the IPCC. Recuperado de: [https://www.ipcc.ch/about/history/#:~:text=The%20Intergovernmental%20Panel%20on%20Climate%20Change%20\(IPCC\)%20was%20established%20by,UN%20General%20Assembly%20in%201988](https://www.ipcc.ch/about/history/#:~:text=The%20Intergovernmental%20Panel%20on%20Climate%20Change%20(IPCC)%20was%20established%20by,UN%20General%20Assembly%20in%201988)
- Lenzen, M., Pade, L. L., y Munksgaard, J. (2004). CO₂ multipliers in multi-region input-output models. *Economic Systems Research*, 16(4), 391-412. Recuperado de: <https://doi.org/10.1080/0953531042000304272>
- Leontief, W. (1970). Environmental repercussions and the economic structure: An input-output approach. *The Review of Economics and Statistics*, 52(3), 262-271. Recuperado de: <https://doi.org/10.2307/1926294>

- Miller, R., y Blair, P. (2009). *Input-Output Analysis Foundations and Extensions* (2ª ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Munksgaard, J., Wier, M., Lenzen, M., y Dey, C. (2005). Using input-output analysis to measure the environmental pressure of consumption at different spatial levels. *Journal of Industrial Ecology*, 9(1-2), 169-185. Recuperado de: <https://doi.org/10.1162/1088198054084699>
- OMM (1985). *Report of the International Conference on the Assessment of the Role of Carbon Dioxide and of Other Greenhouse Gases in Climate Variations and Associated Impacts*. Viena: OMM.
- Rasmussen, P. N. (1957). *Studies in Intersectoral Relations*. Ámsterdam: North-Holland.
- Ruiz Nápoles, P. (2011). Estimación de los costos relativos de las emisiones de gases de efecto invernadero en las ramas de la economía mexicana. *El Trimestre Económico*, 78(309), 173-191. Recuperado de: <https://doi.org/10.20430/ete.v78i309.34>
- Ruiz Nápoles, P. (2012). *Low Carbon Development Strategy for Mexico: An Input-Output Analysis*. México: UNEP.
- Ruiz Nápoles, P. (2014a). *Crecimiento bajo en carbono y adopción de tecnologías para la mitigación. Los casos de la Argentina y el Brasil*. Santiago de Chile: CEPAL.
- Ruiz Nápoles, P. (2014b). Macro Policies For Climate Change: Free Market Or State Intervention? *World Economic Review*, (3), 90-108.
- Ruiz Nápoles, P. (2014c). Políticas de mitigación del cambio climático en México: un análisis de insumo-producto. *Realidad, Datos y Espacio. Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 5(1), 16-31.
- Ruiz-Nápoles, P., Castañeda-León, J., y Moreno-Reyes, E. (2017). Structural analysis of the top five most GHG emitting economies. En O. de Juan, M. Lenszen y M. A. Cadarso (eds.), *Environmental and Economic Impacts of Decarbonization Input-Output Studies on the Consequences of the 2015 Paris Agreements* (pp. 280-319). Londres: Routledge.
- Statistics Canada (2021). Physical flow account for greenhouse gas emissions. Recuperado de: <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/en/tv.action?pid=3810009701>
- Stern, N. (2007). *The Economics of Climate Change, the Stern Review*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Stiglitz, J. E. (1991). *The Invisible Hand and Modern Welfare Economics*

- (NBER Working Paper, 3641). Cambridge, Mass.: NBER. Recuperado de: <https://www.doi.org/10.3386/w3641>
- UNFCCC (2015). The Paris Agreement. Recuperado de: http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php
- UNFCCC (2016). *Aggregate Effect of the Intended Nationally Determined Contributions: An Update* (Framework Convention on Climate Change). Recuperado de: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/2016/cop22/eng/02.pdf>
- World Population Review (2022). Carbon Footprint by Country. Recuperado de: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/carbon-footprint-by-country>