

Energía, desarrollo y cambio climático en México:
análisis de descomposición de las emisiones eléctricas,
2001-2019*

Energy, development, and climate change in Mexico:
Decomposition analysis of electric emissions,
2001-2019

*Rigoberto García
Ochoa***

ABSTRACT

This work aims to analyze the evolution of Mexican electricity emissions and their determinants during 2001-2019. The method of decomposition of emissions is the logarithmic mean Divisia index (IDML); it considers five effects or determinants. The results show an increase in emissions due to the activity, electricity intensity, and trade balance effects, while the generation efficiency and fuel mix effects contributed to a reduction that was insufficient to offset the increase of the remaining factors. The study concludes that the energy policies adopted based on sustainability as a development option have not resulted in a reduction of emissions from electricity generation in Mexico. It concludes by proposing a series of measures to establish a national agenda for electric energy sustainability in Mexico.

Keywords: Energy economics; decomposition analysis of emissions; energy and environment. *JEL codes:* C02, O11, O13.

* Artículo recibido el 5 de octubre de 2022 y aceptado el 23 de febrero de 2023. Su contenido es responsabilidad exclusiva del autor. Dedicado a Daniel Chacón (†), por su impulso a la transición energética en México.

** Rigoberto García Ochoa, El Colegio de la Frontera Norte, Unidad Nogales, Sonora, México (correo electrónico: rigo@colef.mx).

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es analizar la evolución de las emisiones eléctricas de México y sus factores determinantes durante 2001-2019. Se aplica el método de descomposición de emisiones Índice Divisia Media Logarítmica (IDML), con base en cinco efectos o factores determinantes. Los resultados muestran un incremento en las emisiones debido a los efectos de actividad, intensidad eléctrica y balanza comercial, mientras que los efectos de eficiencia en generación y mezcla de combustible contribuyeron a una reducción insuficiente para contrarrestar el incremento de los factores restantes. Se concluye que las políticas energéticas implementadas a partir de la impronta de la sustentabilidad como alternativa de desarrollo no han producido una reducción de las emisiones eléctricas de México. Por último, se propone una serie de acciones para sentar las bases de una agenda nacional de sostenibilidad de energía eléctrica en México.

Palabras clave: economía energética; análisis de descomposición de emisiones; energía y medio ambiente. *Clasificación JEL:* C02, O11, O13.

INTRODUCCIÓN

Los procesos de generación de electricidad, caracterizados por el uso intensivo de recursos fósiles, representan la principal fuente de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el mundo (Agencia Internacional de la Energía [AIE], 2022b). Si se considera que el aumento de la concentración en la atmósfera de este tipo de gases es el determinante clave del calentamiento global antropogénico y que el acceso a la electricidad es un factor indispensable tanto para mejorar la calidad de vida de la población como para el funcionamiento de todos los sectores productivos, parece inminente que México debe transformar su sistema eléctrico a fin de adaptarse a esta nueva realidad.

En esta línea, desde finales de la década de los ochenta, México ha estado incluyendo principios de sustentabilidad en sus políticas de energía eléctrica. Las crisis mundiales del petróleo ocurridas en 1973 y 1979-1981, así como la publicación del *Informe Brundtland* en 1987 —que catapultó el término “desarrollo sustentable” a nivel global— se constituyen ya como hechos

históricos que sentaron las bases para que México, y prácticamente todos los países del mundo, implementaran una serie de cambios legales e institucionales tendientes a mejorar la eficiencia energética e impulsar (por lo menos retóricamente) las energías renovables; esto tiene el objetivo de que se cuente con un sistema eléctrico nacional que coadyuve al desarrollo económico y reduzca las emisiones eléctricas. Algunos de los ejemplos más relevantes de estos cambios legales e institucionales son la creación en 1989 de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (Conae), que en 2008 se transformó en la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (Conuee), y el Programa de Ahorro de Energía en el Sector Eléctrico (PAESE) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), ambos con el auspicio del Plan de Modernización Energética 1989-1994. Un año después, en 1990, se fundó el Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica en México (FIDE); en 1995, el Programa de Desarrollo y Reestructuración del Sector de la Energía 1995-2000; en 2008 se estableció la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética; en 2011, la Estrategia Nacional para la Transición Energética y Aprovechamiento Sustentable de la Energía, y en 2014, el Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía 2014-2018.

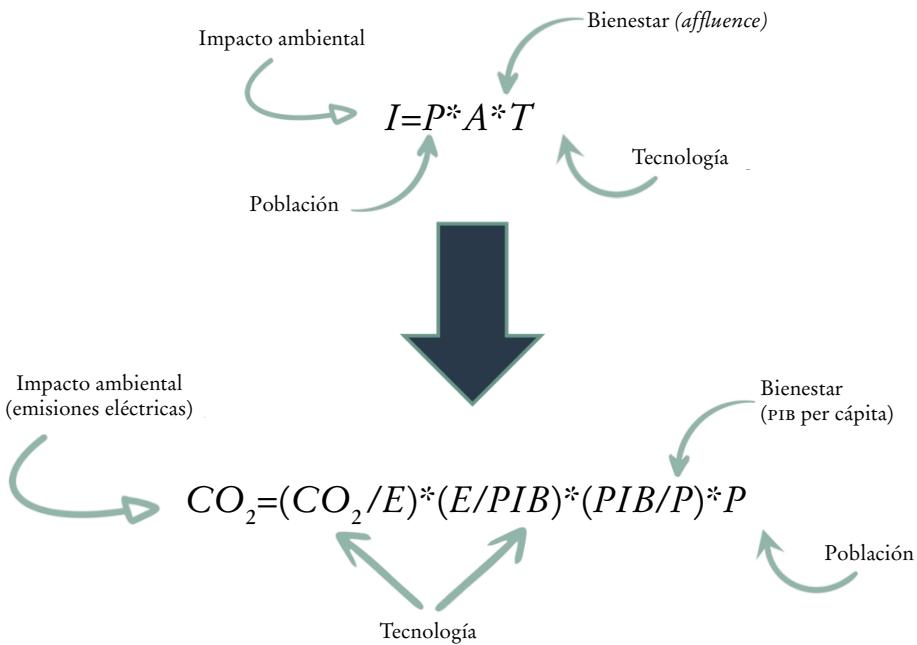
Aunado a lo anterior, justo en este periodo de incorporación de principios de sustentabilidad a la política de energía eléctrica nacional, se fue gestando un cambio trascendental en la relación del Estado mexicano con el sector privado. En 1960 se nacionalizó la industria eléctrica y, desde entonces, fue manejada exclusivamente por el Estado mexicano hasta 1992, cuando se reformó la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica con el objetivo de permitir la entrada de agentes privados en la generación de electricidad. Un ejemplo de ello son los productores independientes de energía (PIE), pequeños productores, cogeneradores y autoabastecedores que, de acuerdo con el marco legal y regulatorio vigente en ese entonces, vendían el total de electricidad generada por ellos a la CFE, exportaban electricidad (en su totalidad a los Estados Unidos) o la utilizaban para el autoabastecimiento local de industrias intensivas en electricidad.

Al respecto, Díaz-Bautista (2005) señala que la reforma de 1992 tenía una serie de deficiencias relacionadas con las condiciones de compra de los combustibles por parte de los inversionistas privados a fin de generar electricidad, situación que volvía prácticamente inviable, en términos financieros, construir las nuevas centrales requeridas por el sistema eléctrico nacional.

Esto condujo a que en 1995 se hicieran cambios adicionales en el marco regulatorio para subsanar las deficiencias comentadas, con lo cual se crearon las condiciones que permitieron una creciente inversión privada en la generación de electricidad. Posteriormente, en 2014 entró en vigor una nueva reforma energética que produjo cambios sustantivos en la Ley de la Industria Eléctrica respecto de la participación del sector privado y gubernamental en la generación y la comercialización de electricidad. Por ejemplo, la CFE se convirtió en una empresa productiva del Estado y se dividió en seis empresas subsidiarias: 1) Generación (con seis divisiones), 2) Transmisión, 3) Distribución, 4) Suministro básico, 5) Internacional y 6) Energía. Mediante este esquema, la CFE tiene el monopolio natural de transmisión y distribución, mientras que compite con el sector privado en las áreas de generación y comercialización. Se creó también la figura de las subastas de corto, mediano y largo plazos, donde cualquier central eléctrica con capacidad igual o mayor al medio megawatt, sea privada o de la CFE, puede competir para participar en el mercado eléctrico nacional. Todos los actores privados que entraron a partir de las reformas de 1992 y 1995 siguen participando en el esquema anterior a la reforma de 2013, mediante los contratos de interconexión legados (CIL), hasta que termine su periodo de vigencia, cuando tendrán que migrar al nuevo esquema.

Ante esta incorporación de principios sustentables en las políticas de suministro y demanda de electricidad en México, aunada a cambios legales y regulatorios que han conducido a una participación conjunta del sector privado con empresas paraestatales a fin de que operen con criterios de eficiencia y productividad, consideramos que es científicamente relevante investigar los resultados obtenidos en materia de emisiones eléctricas y desarrollo sustentable. Partimos entonces de una heurística que busca conocer cómo las políticas implementadas al sistema eléctrico nacional han contribuido al desarrollo sustentable de nuestro país.

Al respecto, una de las líneas de investigación más utilizadas para este fin, dentro del campo de la economía energética, es el análisis de descomposición de índices (ADI) à la identidad de Kaya (1989). Esta última es una adaptación del modelo neomaltusiano IPAT, desarrollado por Ehrlich y Holdren (1971) para conocer los impactos ambientales de las sociedades, para lo cual se evalúa el desempeño de las variables de tamaño de población, el nivel de bienestar o riqueza, y el tipo de tecnología utilizada en el sistema económico (diagrama 1).

DIAGRAMA 1. *Identidad de Kaya como adaptación del modelo IPAT*

FUENTE: elaboración propia con información de Ehrlich y Holdren (1971) y Kaya (1989).

La identidad de Kaya, con base en el modelo IPAT, considera las emisiones energéticas como el impacto ambiental, mientras que los factores que determinan tal impacto son: en su vertiente tecnológica, los indicadores de índice de carbonización (emisiones de CO_2 por unidad de energía) e intensidad energética (energía consumida por unidad de producto interno bruto o PIB producido); en la de riqueza o bienestar económico, el PIB per cápita, y en la demográfica, el tamaño de la población. En esta línea, por medio de las técnicas ADI podemos conocer la evolución de los impactos ambientales y sus factores determinantes en un tiempo específico. Una trayectoria ideal sería, en términos de sustentabilidad, que las emisiones energéticas de México (y de cualquier país, estado, ciudad o región) disminuyan gracias a un incremento de la participación de energías renovables en la matriz energética nacional (con lo cual se reduciría el índice de carbonización), a una mayor eficiencia energética en el consumo (reducción de la intensidad energética),

y a un incremento en el nivel de bienestar de un país (aumento del PIB per cápita).

Cabe destacar que en la actualidad se utilizan más de 120 métodos ADI; los más utilizados son los métodos Laspeyres, Divisia Media Aritmética, Divisia Media Logarítmica, Paasche, Marshall-Edgeworth y Laspeyres mejorado (Ang y Zhang, 2000). Por otra parte, los métodos ADI se utilizan para medir no sólo la evolución de las emisiones eléctricas, sino también la intensidad de las emisiones, es decir, el volumen de emisiones de CO₂ generado por unidad de PIB producido. Es muy importante establecer la diferencia entre ambos indicadores, o sea, entre emisiones e intensidad de emisiones, pues que la actividad económica de un país disminuya su intensidad de emisiones (reducción relativa) no significa un descenso absoluto de sus emisiones totales. Sin duda, es deseable que tal intensidad disminuya, lo cual significa que se está alcanzando un desacoplamiento entre las emisiones de CO₂ y la energía generada y consumida en un país. No obstante, consideramos que el canon político y científico a nivel mundial sobrevalora este desacoplamiento, ya que, a fin de reducir los impactos económicos y sociales procedentes del cambio climático, se requiere ineludiblemente disminuir las emisiones absolutas, y no sólo que la economía de un país sea más eficiente en términos de emisiones.

A escala internacional, hay una serie de trabajos que ha aplicado las técnicas ADI con el objetivo de analizar los factores determinantes tanto de las emisiones energéticas como de la intensidad de emisiones; sin embargo, son pocos los trabajos que han analizado las emisiones eléctricas. Por ejemplo, Shrestha y Timilsina (1996) utilizaron el índice Divisia para analizar la evolución de la intensidad de CO₂ en 12 países asiáticos durante 1980-1990; encontraron que en la mitad de estos países se redujo la intensidad de emisiones (Japón, Hong Kong, Singapur, Malasia, Corea del Sur y Tailandia), y el principal factor que contribuyó a ello fue la intensidad energética.

Shrestha, Anandarajah y Liyanage (2009) aplicaron por su parte el método Índice Divisia log-media (IDLM) a fin de analizar la evolución de las emisiones eléctricas de 15 países de la región Asia y Pacífico durante 1980-2004, en función de cinco factores determinantes: intensidad eléctrica, crecimiento económico, calidad de combustibles, eficiencia de las centrales de generación y proporción o mezcla de combustibles. Los resultados muestran que las emisiones crecieron en todos los países, aunque con ritmos diferentes debido al peso de los distintos factores en cada uno de ellos. En términos

generales, el crecimiento económico condujo a un incremento de las emisiones en todos los países, mientras que la intensidad eléctrica lo hizo en 11 de ellos. Por su parte, la eficiencia en la generación de electricidad tuvo efectos variados, lo que contribuyó a un incremento de las emisiones en ocho países durante 1980-2004, aunque ayudó a una reducción en 13 países durante 1980-1989 y en al menos nueve países durante 1990-1997 y 1998-2004. En cuanto a la mezcla de combustibles, conocida también como “efecto estructura”, ésta contribuyó a una reducción de las emisiones en siete países durante 1980-1989; sin embargo, condujo a un incremento en 11 países durante 1990-1997 y en nueve durante 1998-2004. El resto de los factores tuvo efectos marginales en la evolución de las emisiones.

Malla (2009), por su parte, aplicó también el método IDLM para analizar la evolución de las emisiones eléctricas en siete países de Asia y Norteamérica (Australia, Canadá, China, India, Japón, Corea del Sur y los Estados Unidos) durante 1990-2005, y de manera prospectiva para 2005-2030. Estos países generan 58% de la electricidad global y tres cuartas partes de las emisiones eléctricas globales. Al considerar la producción de electricidad, la mezcla de combustibles en la generación y la intensidad en la generación (eficiencia de las centrales) como los factores determinantes de las emisiones, los resultados de este estudio muestran que durante 1990-2005 las emisiones casi se duplicaron, siendo el efecto de producción de electricidad el que más contribuyó a este incremento, seguido del efecto estructural o de cambio de combustibles en la generación, mientras que los efectos de intensidad eléctrica y de factor de emisión contribuyeron a una reducción de las emisiones. En cuanto al análisis prospectivo que cubre 2005-2030, los resultados muestran que el efecto de producción seguirá siendo el principal factor que contribuya al incremento de las emisiones eléctricas en China, India, Japón y los Estados Unidos; sin embargo, Malla (2009) predice que, si se sigue la tendencia observada en la mezcla de combustibles, el efecto estructural podría generar una reducción significativa de las emisiones en China, Japón y los Estados Unidos.

Steenhof y Weber (2011) aplicaron el método Laspeyres a fin de analizar la evolución de las emisiones eléctricas en 10 provincias de Canadá durante 1990-2008. Estos autores implementaron un método ADI con cuatro factores determinantes: generación de electricidad (demanda), cambio en las fuentes de generación (renovables y no renovables), mezcla de combustibles fósiles en la generación y eficiencia en las centrales de generación. Los resultados muestran que las emisiones crecieron en 24.4% en el periodo

analizado, siendo la demanda de electricidad el factor que más contribuyó a este crecimiento, seguida del cambio en las fuentes de generación, sobre todo en las provincias de Alberta y Saskatchewan. Por el contrario, los incrementos en la eficiencia y los cambios en la mezcla de combustibles fósiles para generar electricidad contribuyeron con una ligera reducción de emisiones.

En China destaca el trabajo de Zhang, Liu, Wang y Zhou (2013), quienes aplicaron el método IDLM para analizar las emisiones eléctricas durante 1999-2009. Este trabajo resulta de gran relevancia científica, ya que su objetivo fue conocer la evolución de las emisiones eléctricas en un país que se ha caracterizado por presentar las más altas tasas de crecimiento económico en las últimas dos décadas. De hecho, estos autores encontraron que en los 10 años del periodo analizado las emisiones eléctricas crecieron a una tasa anual de 8.7%, lo cual se debió principalmente al efecto de actividad económica (crecimiento del PIB). Por el contrario, la eficiencia en la generación de electricidad fue el efecto con mayor impacto en la reducción de emisiones, seguido del efecto de intensidad eléctrica y el de estructura de generación.

Karmellos, Kopidou y Diakoulaki (2016) aplicaron el método de índice Divisia log-media-I (IDLM-I), desarrollado por Ang y Liu (2001), a fin de analizar las emisiones eléctricas de todos los países de la Unión Europea-28 (UE-28) durante 2000-2012, periodo que dividieron en 2000-2007 y 2007-2012 para conocer los efectos producidos por la crisis económica de 2008. Los factores determinantes de las emisiones eléctricas considerados en este estudio son: actividad económica (PIB), intensidad eléctrica, comercio internacional de electricidad, mezcla de combustible y eficiencia de las centrales eléctricas. Los resultados muestran que las emisiones de los 28 países en conjunto permanecieron prácticamente igual durante 2000-2012, con 13 países que lograron una reducción neta y 15 países con un incremento neto. Durante 2000-2007 se observó una tendencia creciente en la que sólo seis países redujeron sus emisiones (Suecia, Eslovaquia, Hungría, Portugal, Francia, e Irlanda). Durante 2007-2012, 23 países redujeron sus emisiones, lo que se magnificó precisamente en 2007-2009 —es decir, justo después de la crisis económica de 2008—, para empezar después una tendencia creciente hasta 2012. Los autores señalan que el efecto producido por el incremento en la proporción de energías renovables y combustibles menos contaminantes en la generación de electricidad, así como el de actividad económica,

fueron los principales factores que contribuyeron a una reducción de emisiones en este periodo, seguidos del comercio internacional (intercambios de electricidad entre los países) y la intensidad eléctrica.

A nivel global destaca el trabajo de Ang y Su (2016), quienes aplicaron el método IDLM para analizar la intensidad de emisiones eléctricas de 124 países durante 1990-2013; encontraron que, en conjunto, se alcanzó una reducción de 15%. El principal factor que contribuyó a ello fue el efecto de eficiencia en las centrales de generación, seguido —aunque con un peso marginal— del efecto de energías renovables y el del cambio en la mezcla de combustibles fósiles (mayor proporción del gas natural). Al analizar de manera particular los 12 países que generan más electricidad a escala global, se encontró que los principales determinantes de su desempeño varían de un país a otro, aunque el único factor que invariablemente mejoró en todos ellos fue el efecto de eficiencia en las centrales de generación. Los autores concluyen que los resultados obtenidos a nivel global no fueron los esperados para 23 años, situación que se debe principalmente a que la mayoría de los países siguió dependiendo de los combustibles fósiles y a que la sustitución del carbón en la mezcla total de combustibles fue marginal, a pesar de los avances logrados en la eficiencia de las centrales de generación.

En el caso de México no encontramos estudios específicos sobre la descomposición de índices ADI aplicados al sector eléctrico nacional, salvo el trabajo realizado por Oliveira (2019), el cual, mediante el método IDLM en 23 países de América Latina y el Caribe, analizó la evolución de la intensidad de emisiones eléctricas durante 1990-2015. Este trabajo destaca por incorporar al estudio de los métodos ADI un factor adicional: capacidad de las centrales de generación. Los resultados muestran que la intensidad de emisiones eléctricas de la región, salvo México y Venezuela, se incrementó durante 1990-2015, debido principalmente a los efectos de capacidad en la generación con combustibles fósiles, de eficiencia en las centrales de generación, y la mezcla de las diferentes centrales de electricidad en la generación total. Este autor concluye que, si bien la proporción de energías renovables se ha incrementado en la región, la penetración y el tiempo de uso de las centrales basadas en combustibles fósiles han sido mayores que los de aquellas basadas en energías renovables.

De acuerdo con la revisión de literatura que acabamos de comentar, consideramos que la aplicación de métodos ADI para conocer la evolución de las emisiones eléctricas en México es un tema de investigación relevante por las razones presentadas a continuación.

En primer lugar, los resultados de todos estos trabajos evidencian que las políticas de eficiencia y de energías renovables implementadas en los países analizados no han generado una reducción, o al menos una estabilización, de las emisiones eléctricas, y en los únicos casos donde sí se presentó una reducción —en unos cuantos países europeos— tuvo un peso muy importante la crisis económica de 2008. Por otra parte, si bien la intensidad de emisiones (CO_2/PIB) se redujo en algunos países, como en México, esto no significa necesariamente una reducción absoluta de las emisiones. La sustentabilidad eléctrica ha sido en realidad un mito, ya que no se ha comprobado que el crecimiento económico conduce a una reducción de las emisiones. En esta línea, consideramos que es científicamente pertinente generar conocimiento empírico que nos permita conocer la situación que se ha presentado en México sobre este tema.

En segundo lugar, con base en lo expuesto en el punto anterior, el cambio climático requiere un esfuerzo global para que todos los países, al aplicar el principio de responsabilidades comunes pero diferenciadas de acuerdo con sus capacidades, alcancen el objetivo de 1.5 grados de sobrecalentamiento global (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC], 2019). En este sentido, México requiere contar con información precisa sobre los factores que determinan el nivel de emisiones procedentes de todas las fuentes —como la generación de electricidad—, a fin de diseñar e implementar políticas públicas encaminadas al logro de los objetivos y las metas comprometidos que conduzcan efectivamente a una reducción absoluta de las emisiones.

En tercer lugar, la pandemia de covid-19 ha derivado en una ralentización de la economía mundial. Con base en que la electricidad asequible y segura es un elemento fundamental para el desarrollo económico y sustentable de cualquier país, hace falta información precisa para analizar las opciones que tenemos como país, para que los patrones de producción y consumo de electricidad contribuyan a un desarrollo económico y social equitativo, así como a una reducción de los impactos ambientales locales y globales.

Con estos antecedentes, el objetivo de este trabajo es analizar la evolución de las emisiones eléctricas de México y sus factores determinantes durante 2001-2019, a fin de conocer el aporte de los procesos de producción y consumo de electricidad al desarrollo sustentable nacional. Elegimos este periodo por la disponibilidad de información precisa a partir de inicios de la década del 2000; además, esto nos permite conocer la evolución de las emisiones eléctricas a partir de la entrada en operación de los nuevos agentes privados que

empezaron a generar electricidad precisamente a partir de 2001 debido a las reformas, las adiciones y las derogaciones hechas a la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica en 1992 y 1995, como lo comentamos previamente.

I. METODOLOGÍA

1. *Método de descomposición*

A fin de conocer la evolución de las emisiones eléctricas de México durante 2001-2019, aplicamos un análisis de descomposición de emisiones basado en índices (ADI) de acuerdo con la propuesta de Karmellos et al. (2016) comentada en la sección anterior y que considera los siguientes factores (ecuación [1]):

$$CO_{2t} = PIB_t * (EC_t/PIB_t) * (EP_t/EC_t) * \sum_i (F_{it}/EP_{it}) * (F_{it}/F_t) * fe_{it} \quad (1)$$

Donde:

- a) CO_{2t} =impacto ambiental derivado de las emisiones de bióxido de carbono procedentes de la generación de electricidad en México en el año t .¹ Las centrales generadoras pertenecen a la CFE, los PIE, los auto-productores (autoabastecimiento local y remoto) y los generadores (subastas).
- b) PIB_t =actividad económica medida con el PIB nacional en el año t (millones de pesos).
- c) EC_t/PIB_t =intensidad eléctrica que representa la cantidad de energía eléctrica consumida (EC) para producir una unidad monetaria del PIB nacional (EC/PIB) en el año t . La electricidad consumida total es la suma de electricidad producida y las importaciones netas de electricidad (Gwh).
- d) EP_t/EC_t =balanza comercial de electricidad que corresponde al cociente de la electricidad producida (EP) y consumida (EC) en el país en el año t . Una balanza comercial mayor a la unidad significa que el país es exportador neto de electricidad; por el contrario, si es menor a la unidad, sig-

¹ En lo sucesivo nos referiremos a este tipo de emisiones indistintamente como “emisiones eléctricas” o simplemente “emisiones”.

nifica que es importador neto. La electricidad producida es la suma de la electricidad generada en todas las centrales eléctricas del país, de todo tipo de fuentes, en el año t (GWh).

- e) $\Sigma(F_{it}/EP_{it})$ = eficiencia energética en la generación de electricidad, la cual mide el cociente de la suma de las entradas de energía de los diferentes combustibles o energéticos (renovables y no renovables) a las centrales eléctricas (medidas en terajoules o TJ) y la suma de electricidad producida por cada una de estas centrales (medida en GWh) en el año t .
- f) Suma de todos los combustibles que entran a las centrales para generar electricidad en el año t , medido en terajoules.
- g) F_{it}/F_t = mezcla de combustibles en el año t , medido con el cociente del combustible i y la suma de todos los combustibles (medida en TJ) que entran a las centrales eléctricas en el año t .
- h) fe_{it} = factor de emisión de CO_2 del combustible i , medido en toneladas de CO_2 emitido por terajoules.

En cuanto al método ADI empleado en este trabajo, decidimos utilizar el Índice Divisia Media Logarítmica (IDML) desarrollado por Ang y Choi (1997), ya que ofrece una serie de ventajas metodológicas sobre los demás métodos de descomposición. Entre éstas destaca que es un método de descomposición perfecta, lo cual significa que no hay residuos en los resultados obtenidos, situación que permite interpretarlos con más precisión. Otra ventaja de este método es que puede trabajar con valores nulos (cero) en las variables que componen los diferentes efectos, lo cual, de acuerdo con Ang y Zhang (2000), facilita los cálculos cuando se trabaja en sistemas que comienzan o dejan de utilizar un determinado combustible, o bien cuando se trabaja con energías que presentan factores de emisión igual a cero, como sucede con las energías renovables y la nuclear. Por último, una ventaja adicional del método IDML es que facilita los cálculos cuando se trabaja con muchas variables, ya que, en nuestro caso, analizamos cinco efectos para comprender la descomposición de emisiones eléctricas, como se muestra en la ecuación (2).

$$\Delta CO_2 = CO_{2tf}/CO_{2ti} = E_{Tot} = E_A * E_{IE} * E_{BC} * E_{EE} * E_{MC} \quad (2)$$

Donde:

- a) ΔCO_2 = cambio de las emisiones eléctricas en el periodo $T_f - T_i$.

- b) CO_{2tf} = emisiones energéticas en el año final (T_f) del periodo.
- c) CO_{2ti} = emisiones energéticas en el año inicial (T_i) del periodo.
- d) E_{Tot} = efecto total o cambio de las emisiones de CO_2 en el periodo T_f-T_i .
- e) E_A = efecto de actividad que mide el cambio en el PIB en el periodo T_f-T_i .
- f) E_{IE} = efecto de intensidad que mide el cambio en la intensidad eléctrica de la economía mexicana durante el periodo T_f-T_i .
- g) E_{BC} = efecto de balanza comercial que mide el cambio de la balanza comercial de electricidad en el periodo T_f-T_i .
- h) E_{EE} = efecto de eficiencia que mide el cambio de la eficiencia energética de los procesos de producción de electricidad en el periodo T_f-T_i .
- i) E_{MC} = efecto de mezcla de combustible que mide los cambios de la proporción de los diferentes combustibles en el total de energía que entra a las centrales eléctricas durante el periodo T_f-T_i .

De acuerdo con el método IDML de Ang y Choi (1997) aplicado a la función de Karmellos et al. (2016), el valor de cada uno de los efectos se calcula con las siguientes ecuaciones:

Efecto actividad (E_A):

$$E_A = \exp[\sum_i w_i * \ln(E_{Atf}/E_{Ati})] = \\ \exp \exp \left[\sum_i \frac{(CO_{2i}^{tf} - CO_{2i}^{ti}) / (\ln CO_{2i}^{tf} - \ln CO_{2i}^{ti})}{(CO_2^{tf} - CO_2^{ti}) / (\ln CO_2^{tf} - \ln CO_2^{ti})} * \ln \left(\frac{E_A^{tf}}{E_A^{ti}} \right) \right] \quad (3)$$

Efecto intensidad energética (E_{IE}):

$$E_{IE} = \exp[\sum_i w_i * \ln(E_{IEtf}/E_{IEti})] = \\ \exp \exp \left[\sum_i \frac{(CO_{2i}^{tf} - CO_{2i}^{ti}) / (\ln CO_{2i}^{tf} - \ln CO_{2i}^{ti})}{(CO_2^{tf} - CO_2^{ti}) / (\ln CO_2^{tf} - \ln CO_2^{ti})} * \ln \left(\frac{E_{IE}^{tf}}{E_{IE}^{ti}} \right) \right] \quad (4)$$

Efecto balanza comercial (E_{BC}):

$$E_{BC} = \exp[\sum_i w_i * \ln(E_{BCtf}/E_{BCti})] = \\ \exp \exp \left[\sum_i \frac{(CO_{2i}^{tf} - CO_{2i}^{ti}) / (\ln CO_{2i}^{tf} - \ln CO_{2i}^{ti})}{(CO_2^{tf} - CO_2^{ti}) / (\ln CO_2^{tf} - \ln CO_2^{ti})} * \ln \left(\frac{E_{BC}^{tf}}{E_{BC}^{ti}} \right) \right] \quad (5)$$

Efecto eficiencia (E_{EE}):

$$E_{EE} = \exp[\sum_i w_i * \ln(E_{EEtf}/E_{EEti})] = \quad (6)$$

$$\exp \exp \left[\sum_i \frac{(CO_{2i}^{tf} - CO_{2i}^{ti}) / (\ln CO_{2i}^{tf} - \ln CO_{2i}^{ti})}{(CO_2^{tf} - CO_2^{ti}) / (\ln CO_2^{tf} - \ln CO_2^{ti})} \ln \left(\frac{E_{EE}^{tf}}{E_{EE}^{ti}} \right) \right]$$

Efecto mezcla de combustible (E_{MC}):

$$E_{MC} = \exp \left[\sum_i wi * \ln \left(\frac{E_{MCtf}}{E_{MCti}} \right) \right] = \\ \exp \exp \left[\sum_i \frac{(CO_{2i}^{tf} - CO_{2i}^{ti}) / (\ln CO_{2i}^{tf} - \ln CO_{2i}^{ti})}{(CO_2^{tf} - CO_2^{ti}) / (\ln CO_2^{tf} - \ln CO_2^{ti})} \ln \left(\frac{E_{MC}^{tf}}{E_{MC}^{ti}} \right) \right]$$

2. Marco temporal y espacial

El análisis ADI de las emisiones eléctricas de México cubre el periodo de 2001 a 2019 por las razones expuestas en la sección de introducción, y los resultados son válidos a escala nacional.

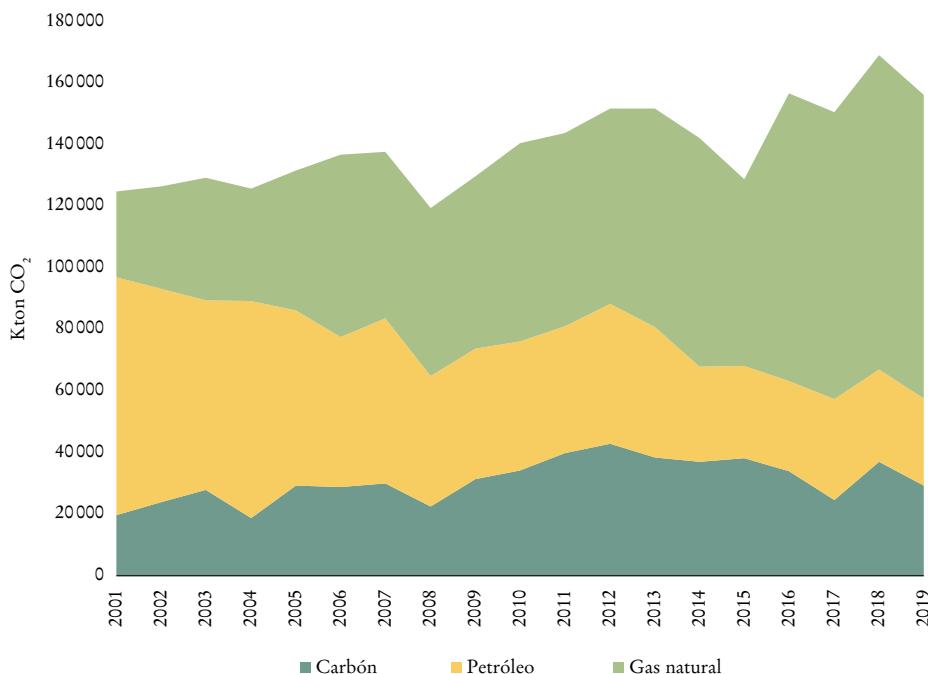
3. Fuentes de información

La información correspondiente a la energía que ingresa a las centrales eléctricas, ya sea de la CFE, los PIE, los autoproductores o las generadoras, así como la de la generación bruta y neta, la importación, la exportación y las pérdidas de electricidad, proviene de los balances nacionales de energía (Secretaría de Energía [Sener], varios años). Los factores de emisión de los combustibles utilizados para generar electricidad se tomaron de la actualización del Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010 (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2012). La información económica referente al PIB anual proviene del Sistema de Cuentas Nacionales de México (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2021), expresada en millones de pesos a precios constantes de 2013. Esta información se resume en los cuadros A1, A2 y A3 del apéndice.

II. RESULTADOS

1. Evolución de las emisiones totales

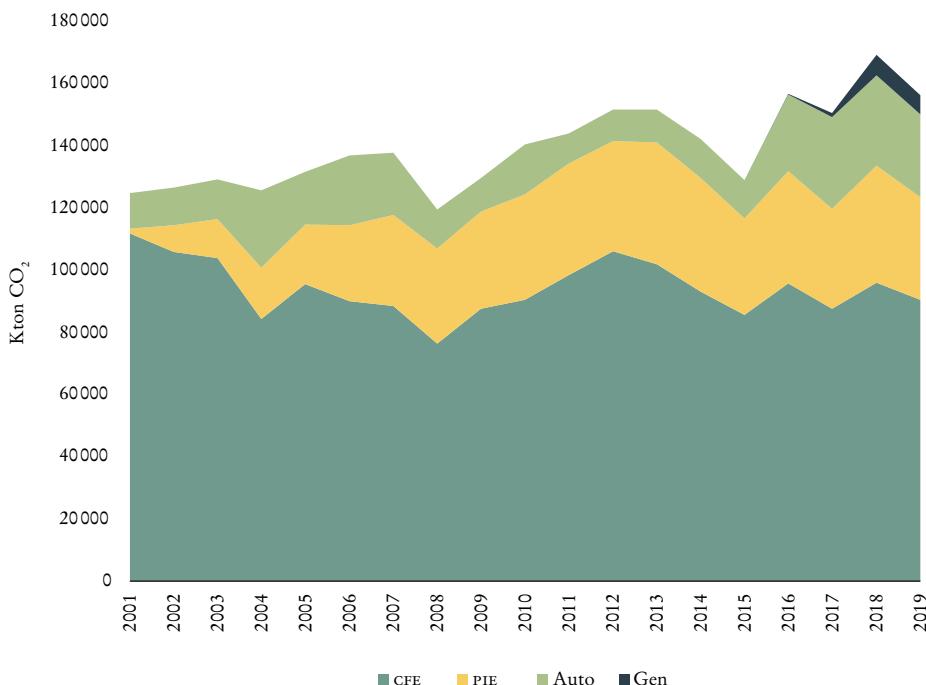
La gráfica 1 muestra la evolución de las emisiones eléctricas en México durante 2001-2019. En estos 19 años las emisiones se incrementaron en 25.2%;

GRÁFICA 1. *Evolución de las emisiones eléctricas de México (2001-2019)*

FUENTE: elaboración propia.

pasaron de 124 749 a 156 169 toneladas de bióxido de carbono (Kton CO₂). Al observar esta tendencia identificamos tres puntos que nos parece importante comentar. En primer lugar, las emisiones evolucionaron de manera errática, con incrementos y reducciones constantes durante todo el periodo; sin embargo, a partir de 2016 se presentaron los mayores incrementos, de tal forma que en 2018 se alcanzó el máximo histórico de 169 175 Kton CO₂. Este dato es relevante, ya que justo en 2016 fue cuando entraron en operación las primeras centrales generadoras en el marco regulatorio de la reforma energética de 2014. Más adelante comentaremos con mayor detalle este tema.

En segundo lugar, identificamos una reducción sustantiva de las emisiones procedentes de las centrales eléctricas que usan petrolíferos (combustible y diésel principalmente) y un incremento igualmente importante de las emisiones procedentes de centrales eléctricas que usan gas natural. En el

GRÁFICA 2. *Evolución de las emisiones eléctricas de México (2001-2019)*

FUENTE: elaboración propia.

caso de las primeras, se redujeron en 63%, mientras que en las segundas el incremento fue de 255%. Esto nos advierte (a reserva de comprobarlo más adelante) sobre una sustitución de petrolíferos por gas natural en la generación de electricidad, lo cual habría tenido repercusiones ambientales positivas por las diferencias que existen en el contenido de carbono en ambos combustibles, así como por la mayor eficiencia de las centrales de ciclo combinado con gas natural.

En tercer lugar, observamos un notable incremento de las emisiones procedentes del carbón ($\approx 49\%$), ya que pasaron de 19 625 a 29 268 Kton CO₂ en el periodo analizado. Llama la atención este resultado, pues evidencia una clara inconsistencia entre lo que se dice y establece en los planes y los instrumentos de desarrollo relacionados con la energía y el cambio climático y lo que se hace en la realidad. Es decir, el discurso de la descarbonización y un uso más intensivo de las energías renovables queda en entredicho

cuando comprobamos que la proporción de las emisiones procedentes del carbón se incrementaron de esta manera durante 2001-2019.

Al pasar ahora a revisar la evolución de las emisiones de acuerdo con el tipo de generador, vemos cambios evidentes en la aportación de cada uno (gráfica 2). En 2001 casi 90% de las emisiones provenía de la CFE; 9%, de las entonces centrales autoproductoras, y sólo 1%, de los PIE; mientras que en 2019 las cifras cambiaron drásticamente a 58, 17 y 21%, respectivamente, y el restante 4% procede de las centrales generadoras que entraron en operación a partir de 2016, debido a la implementación de la reforma energética de 2014. Se observa también claramente cómo a partir de 2016 las centrales de autoabastecimiento, y en mucha menor medida las centrales generadoras que ganaron las subastas correspondientes, aportaron el incremento de las emisiones ya comentadas a partir de este año.

Estos resultados evidencian que las emisiones eléctricas de México siguieron una tendencia creciente durante 2001-2019, la cual creció aún más a partir de 2016, cuando entraron en operación las centrales eléctricas que operaron ya con el nuevo marco regulatorio establecido por la reforma energética de 2014. De hecho, el incremento en las emisiones a partir del primer año del periodo analizado proviene de las centrales privadas, ya que éstas fueron las que en su mayoría iniciaron sus operaciones durante este lapso, como veremos más adelante. Por otra parte, el cambio más importante en la evolución de emisiones de los diferentes combustibles fue el que ocurrió entre el gas natural y los petrolíferos, ante lo cual inferimos que si no hubiere ocurrido dicho cambio, las emisiones serían mayores por las diferencias que tienen estos combustibles en su contenido de carbono (véase el cuadro A2 del apéndice).

Habiendo identificado la tendencia de las emisiones en 2001-2019, comentaremos a continuación los resultados obtenidos mediante el método ADI a fin de conocer el efecto de cada uno de los seis factores considerados en nuestro análisis. El cuadro 1 resume los valores de los seis efectos calculados para cada año y, en la parte inferior, se muestran los efectos acumulados en los 18 años del periodo analizado.

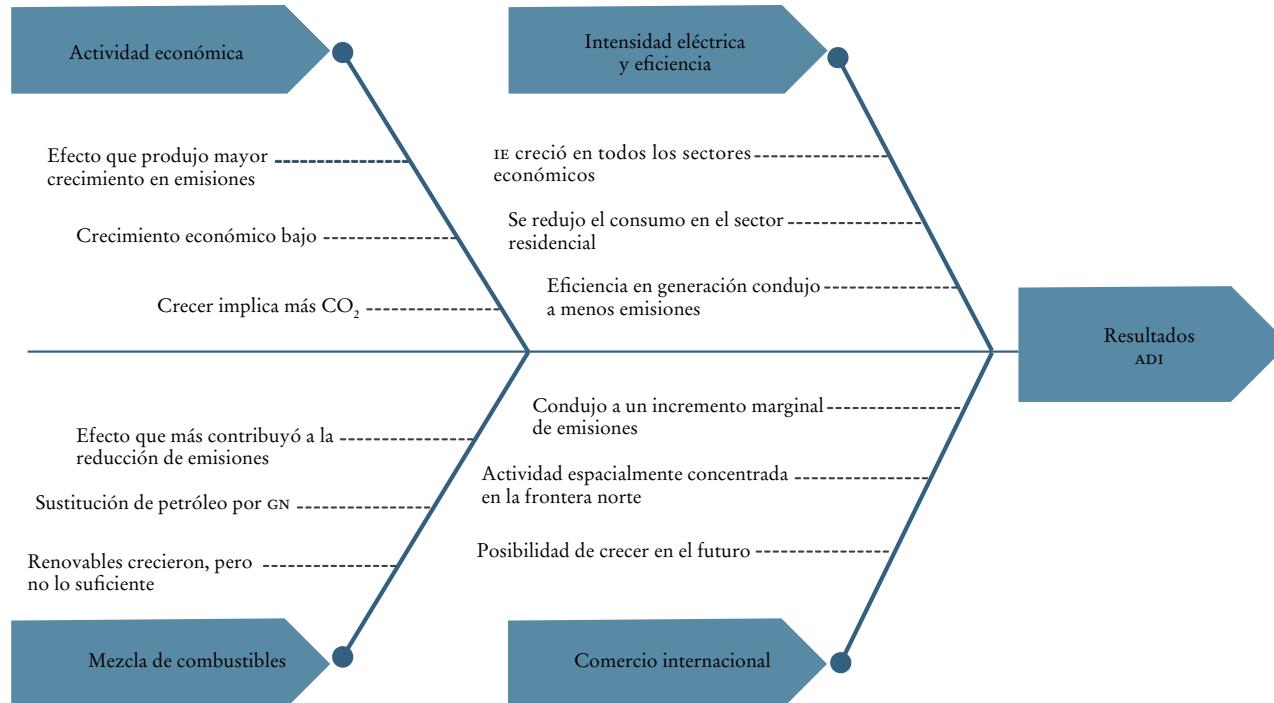
En esta línea, el efecto total (E_{tot}) acumulado muestra un valor de 1.200 que, al estar expresado en base logarítmica, refleja que las emisiones se incrementaron en 20% (1.200-1). El efecto que tuvo más peso en este aumento fue el de actividad, ya que aumentó en 39.7% ($EA=1.397$), seguido del de intensidad eléctrica con 14.4% ($EI=1.144$) y un incremento marginal de 0.4%

CUADRO 1. Evolución de los efectos de actividad, intensidad, balanza comercial, eficiencia y mezcla de combustible en el efecto total de emisiones (2001-2019)

Periodo	E_{tot}	EA	EI	EBC	EE	ES	EIC
2001-2002	1.006	1.000	1.027	0.999	0.996	1.001	0.983
2002-2003	1.036	1.014	0.997	1.005	1.001	1.009	1.009
2003-2004	0.904	1.039	1.017	1.000	1.035	0.825	1.001
2004-2005	1.065	1.023	0.980	1.001	0.969	1.151	0.952
2005-2006	1.101	1.045	1.032	0.998	1.002	0.965	1.058
2006-2007	0.995	1.023	1.015	1.001	0.955	1.015	0.987
2007-2008	0.868	1.011	0.998	1.000	0.950	0.901	1.006
2008-2009	1.034	0.947	1.053	0.999	0.983	1.126	0.937
2009-2010	1.105	1.051	0.988	0.999	1.035	1.009	1.018
2010-2011	0.999	1.037	1.029	1.000	0.967	0.992	0.978
2011-2012	1.041	1.036	0.974	1.012	1.001	1.028	0.990
2012-2013	0.984	1.014	0.985	1.005	1.030	0.963	0.988
2013-2014	0.889	1.028	0.956	1.004	0.988	0.894	1.020
2014-2015	0.976	1.033	1.025	0.998	0.920	1.015	0.988
2015-2016	1.211	1.026	1.010	0.994	1.148	1.015	1.008
2016-2017	0.958	1.021	1.008	1.001	0.933	0.971	1.026
2017-2018	1.106	1.022	1.007	0.993	1.065	1.060	0.958
2018-2019	0.966	0.998	1.050	0.993	0.872	1.004	1.060
2001-2019	1.200	1.397	1.144	1.004	0.832	0.953	0.943

FUENTE: elaboración propia con los resultados del método ADI aplicado.

DIAGRAMA 2. *Principales resultados obtenidos en los cinco efectos considerados en el método ADI aplicado*



FUENTE: elaboración propia.

del de balanza comercial ($EBC = 1.004$). En cambio, el de eficiencia en la generación de electricidad (EE) presenta un valor de 0.832, lo cual significa que contribuyó con una reducción en las emisiones de 16.8% (1-0.832). En cuanto al de mezcla de combustible, vemos que contribuyó a una pequeña reducción de 5.7% (1-0.943).

A continuación, explicaremos con mayor detalle los resultados obtenidos en cada uno de los cinco efectos considerados en nuestro análisis, resumidos en el diagrama 2.

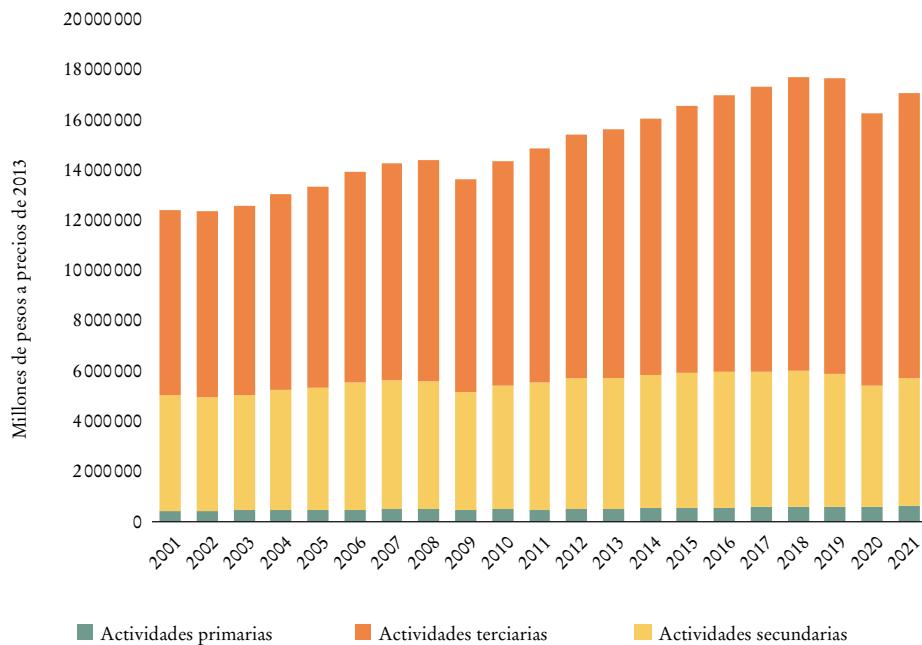
2. Efecto de actividad económica

Ya comentamos que la evolución del PIB (efecto de actividad económica) es el factor que más contribuyó al incremento de las emisiones eléctricas. Al respecto, de acuerdo con los datos ofrecidos por el Banco de Información Económica (INEGI, 2022), habría que señalar que el crecimiento económico de México fue bajo durante el periodo analizado, con una tasa de crecimiento anual de sólo 2%. La gráfica 3 muestra el crecimiento del PIB de las principales actividades económicas —es decir, primarias, secundarias y terciarias—; encuentra que fue de 1.8, 0.8, y 2.6%, respectivamente. Este escenario evidencia que, si queremos crecer económicamente para alcanzar un desarrollo económico y social más equitativo, sobre todo a raíz de la pandemia de covid-19 (como podemos observar en la misma gráfica, el PIB cayó significativamente en 2020 y 2021), habría que impulsar las acciones necesarias en todas las actividades económicas, principalmente en las secundarias y terciarias, ya que son las que tienen mayor peso en el PIB nacional.

Sin embargo, un mayor crecimiento económico conduciría ineludiblemente a un mayor consumo de electricidad y, si se mantuviera la tendencia actual en el resto de los factores, esto conllevaría mayores emisiones. Cabe entonces preguntarnos: ¿debemos priorizar el crecimiento y el desarrollo económico del país a expensas de sus impactos ambientales globales?, ¿debemos priorizar una reducción de los impactos ambientales, a pesar de que la participación de México en las emisiones globales es marginal?, o ¿podemos entrar en una verdadera ruta de sustentabilidad en la cual crecemos económicamente y reducimos los impactos ambientales?

A fin de responder estas preguntas, debemos primero dejar en claro que el discurso de la sustentabilidad ha estado impregnado históricamente de símbolos que aluden a la posibilidad de alcanzar un desarrollo económico en

GRÁFICA 3. *Evolución del PIB anual de las actividades económicas primarias, secundarias y terciarias en México (2001-2019)*



FUENTE: elaboración propia con datos del INEGI (2021).

armonía con el medio ambiente. Desde la Cumbre del Medio Humano de Estocolmo en 1972, pasando por Nairobi 1982, Río 1992, Johannesburgo 2002, Río +20 en 2012, y Estocolmo +50 en 2022, hasta invariablemente todas las conferencias de las partes (COP) que se han celebrado anualmente desde 1995, se ha estado planteando derrumbar la visión dicotómica de considerar el medio ambiente como un obstáculo para el desarrollo económico. Lo que se ha sugerido desde entonces, y que se plasmó en el enfoque de desarrollo sustentable del *Informe Brundtland* en 1986, es que incluso el crecimiento económico es una condición necesaria para proteger al medio ambiente, y dos de las medidas omnipresentes en toda estrategia o plan de desarrollo sustentable ligado al vínculo entre energía y cambio climático son mejorar la eficiencia energética y generar electricidad con fuentes renovables. Analizaremos primero los resultados obtenidos en lo que se refiere a la eficiencia

energética y, para ello, lo haremos tanto en el lado de la demanda (intensidad eléctrica) como en el del suministro (eficiencia en la generación).

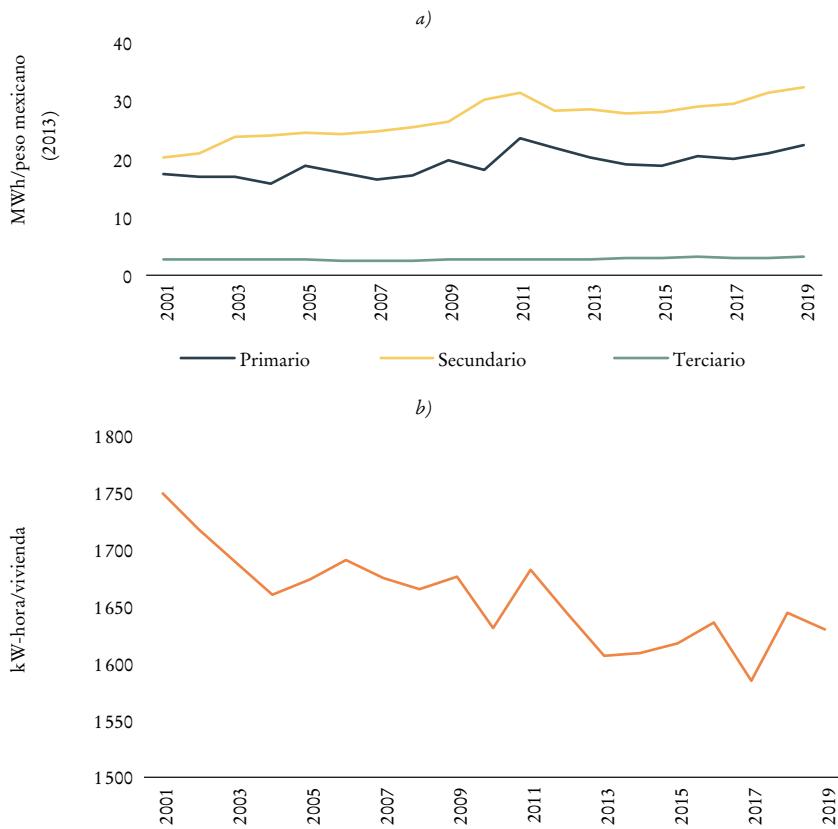
3. Efectos de intensidad eléctrica y eficiencia en generación

La intensidad eléctrica se define como la cantidad de electricidad consumida para producir una unidad monetaria de su PIB. Los supuestos teóricos que subyacen a este indicador son *la productividad y la eficiencia*, es decir, producir más con menos electricidad, lo cual implica teóricamente que se puede alcanzar un desacoplamiento entre crecimiento económico y consumo de energía. Es así que una tendencia adecuada de este indicador, en términos de sustentabilidad, implica su reducción con el paso del tiempo.

Como lo mencionamos en la sección de introducción, México ha impulsado desde finales de la década de los ochenta una serie de políticas de eficiencia energética; sin embargo, en el caso del sistema eléctrico nacional, nuestros resultados muestran que el efecto intensidad eléctrica contribuyó a un incremento de 14.3% en las emisiones, lo cual significa que en 2019 se requirió más electricidad para producir un peso del PIB nacional que en 2001. Al desagregar las trayectorias de la intensidad eléctrica de los diferentes sectores económicos, comprobamos que, a excepción del sector residencial, en todos los casos la intensidad eléctrica se incrementó durante el periodo analizado (gráfica 4).

Ante estos resultados, parece obvio que se requiere mejorar la eficiencia en todos los sectores a fin de que el sistema eléctrico nacional contribuya a un desarrollo sustentable, con un énfasis en el sector industrial, ya que, de acuerdo con el Balance Nacional de Energía 2019 (Sener, 2020), encontramos que sólo este sector consume 60% del total de la electricidad en México. El comportamiento de la intensidad eléctrica de las actividades industriales en conjunto, ante este peso que tienen en el consumo final de electricidad, ejerce un efecto sustantivo en la evolución de las emisiones eléctricas. De ahí nuestra sugerencia de fortalecer la política de eficiencia energética en este sector, sin menoscabo del resto de los sectores, subsectores o ramas, incluso en el sector residencial, donde si bien hubo una reducción en el consumo eléctrico por vivienda (7%), todavía es insuficiente, por lo que consideramos que hay una ventana de oportunidad para mejorar sustantivamente los resultados que se han obtenido hasta hoy.

GRÁFICA 4. *Evolución de la intensidad eléctrica por sectores económicos y consumo de electricidad por vivienda en México (2001-2019)*



a) Intensidad eléctrica en actividades primarias, secundarias y terciarias

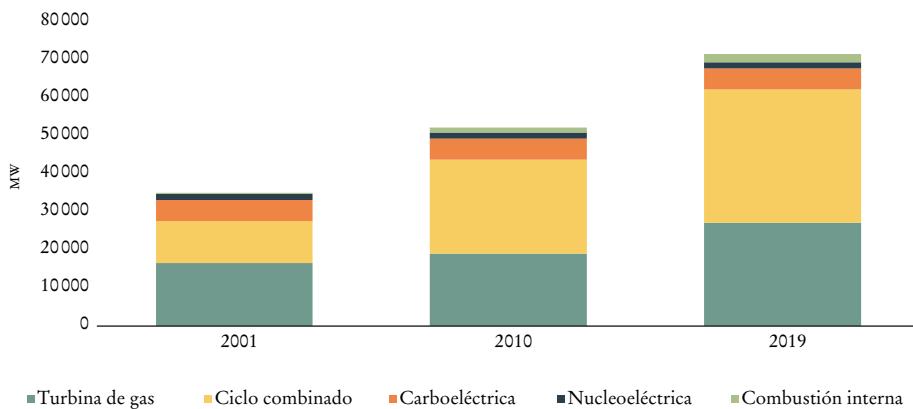
- El sector industrial consume 60% del total de electricidad en México.
- En 2001 el sector industrial requería 20.1 MWh para producir un peso del PIB (valores constantes a 2013), mientras que en 2019 se requerían 32.2 MWh (60.4 por ciento).
- El sector primario participa con sólo 4.6% del total de electricidad en México, y experimentó un incremento notable en su intensidad eléctrica ($\approx 29\%$), de 17.2 a 22.2 MWh.
- Las actividades terciarias consumen 12.3% de electricidad en México, y su intensidad creció 17 por ciento.

b) Consumo de electricidad por vivienda en sector residencial

- El sector residencial consume alrededor de 23% del total de electricidad en México.
- Es el segundo sector con mayor participación en el consumo total de electricidad, sólo detrás de la industria.
- Lo importante a destacar es una reducción en el consumo eléctrico por vivienda cercana a 7%, pasó de 1749 a 1629 kWh.

FUENTE: elaboración propia con datos del Sistema de Información Económica del Banco de México de 2022.

GRÁFICA 5. *Capacidad de las centrales eléctricas que operan con combustibles fósiles y uranio (2001, 2010 y 2019)*



- La capacidad de las centrales carboeléctricas, nucleoeléctricas y de combustión interna permaneció prácticamente sin cambios.
- La proporción de la capacidad del gas natural pasó de 24 a 38 por ciento.
- Mientras que la de las centrales termoeléctricas con turbina de vapor y turbina de gas se redujo de 36 a 30 por ciento.

FUENTE: elaboración propia con datos de Sener (2002, 2011, y 2020).

Pasamos ahora a ver los resultados de eficiencia energética en el lado de la generación, es decir, de las centrales eléctricas que operan en México. Nuestros resultados muestran que el efecto de eficiencia produjo una reducción de emisiones de 17.2%. De hecho, éste es el efecto que más contribuyó a la reducción de emisiones. A fin de comprender el porqué de este resultado positivo en torno a la sustentabilidad eléctrica del país, la gráfica 5 muestra la evolución de la capacidad de las centrales eléctricas que operan con recursos fósiles —es decir, carbón, derivados del petróleo y gas natural—, así como con energía nuclear que se obtiene del uranio, en tres momentos del periodo: 2001, 2010 y 2019.

Sobre esto, vemos que los cambios más relevantes respecto de las tecnologías para generar energía eléctrica ocurrieron en las centrales de ciclo combinado y en las de turbinas de vapor y gas, tanto en capacidad absoluta como relativa (gráfica 5). En 2001 las centrales de ciclo combinado sumaban en total 11 013 MW de capacidad (31%), lo que subió a 24 773 en 2010 (47%) y a 35 083 en 2019 (49%). En las segundas hubo un crecimiento absoluto de la capacidad, pero se redujo su participación porcentual: de 16 692 MW en 2001

(48%) a 16 089 en 2010 (37%) y 27 259 en 2019 (38%). Por el contrario, la capacidad de las centrales carboeléctricas, nucleoeléctricas y de combustión interna permaneció prácticamente igual o con cambios marginales respecto del total.

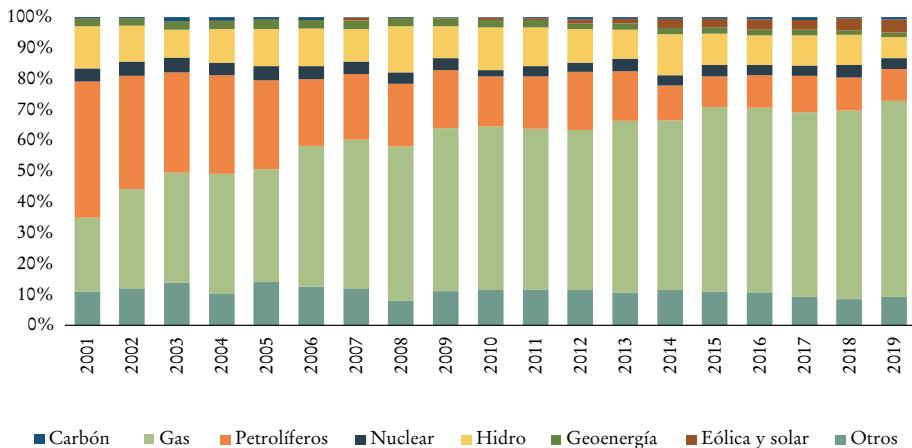
En la actualidad, las centrales de ciclo combinado son las más eficientes para generar energía eléctrica, ya que alcanzan valores que superan 60% de conversión, mientras que las centrales termoeléctricas convencionales, sean con turbinas de gas o vapor, presentan una eficiencia promedio de aproximadamente 35%. De esta manera, el incremento en la capacidad absoluta y relativa de las centrales de ciclo combinado, y en menor medida de las centrales convencionales más modernas que entraron en operación después de 2001, es el principal factor que explica la reducción de las emisiones explicada por el efecto de eficiencia.

Cabe destacar que el combustible más utilizado en las centrales de ciclo combinado, así como en una proporción importante de las centrales convencionales con turbina de gas o vapor, es el gas natural. Si bien este cambio tecnológico se tradujo en una mayor eficiencia de las centrales eléctricas, y a su vez en una reducción de las emisiones, ha conducido también a una mayor dependencia de este combustible que, dicho sea de paso, es necesario importar casi en su totalidad. A fin de tener una idea más clara de esta dependencia, del total de energía eléctrica generada en 2001, 23% provenía del gas natural, mientras que en 2019 subió a 64%. Con esto comprobamos lo que comentamos previamente sobre la sustitución de petrolíferos por gas natural en la generación de electricidad en México. Reiteramos que, si bien ganamos en eficiencia energética en los procesos de generación —lo que condujo a una reducción de emisiones—, perdimos en seguridad energética, por la alta dependencia de un combustible que no producimos en México. Esto nos convierte en un país energéticamente vulnerable ante una posible eventualidad de falla en el suministro de este combustible.

4. Efecto de mezcla de combustible

El efecto de mezcla de combustible se relaciona directamente con la proporción de recursos renovables y no renovables con los cuales se genera energía eléctrica. Los resultados de este indicador nos permiten conocer no sólo la penetración de energías renovables, sino también los cambios que se dan entre los mismos combustibles fósiles y la energía nuclear. Como ya lo comen-

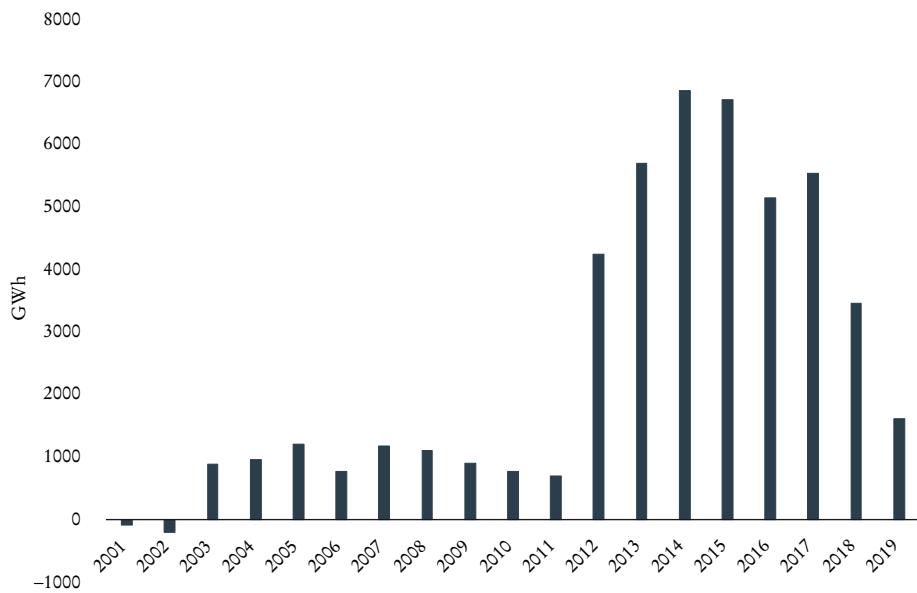
GRÁFICA 6. *Proporción en la generación de electricidad por tipo de combustible o energía primaria (2001-2019)*



FUENTE: elaboración propia con datos de Sener (2002, 2011 y 2020).

tamos, este efecto produjo una pequeña reducción de 5.5% en las emisiones, la cual fue insuficiente para contrarrestar el incremento que se presentó en las emisiones totales por el comportamiento del resto de los factores o efectos. En esta línea, a fin de conocer a mayor detalle los resultados obtenidos en el efecto mezcla de combustible, la gráfica 6 muestra la evolución de la proporción (en porcentaje) en la generación de electricidad por tipo de combustible, o energía primaria.

Ya en la gráfica 5 mostramos la capacidad de las centrales que operan exclusivamente con combustibles fósiles y nuclear (análisis de eficiencia de las centrales), pero ahora veremos lo que ocurre con la generación de todas las centrales de generación. En este sentido, comprobamos nuevamente lo que ya habíamos comentado sobre una sustitución de combustibles derivados del petróleo por gas natural. Nótese cómo en 2001 aproximadamente 44% de la electricidad se generaba con derivados del petróleo (combustóleo y diésel) y en 2019 esta proporción cayó hasta 10%, mientras que el gas natural, por el contrario, creció de 24 a 64% en el mismo periodo. La proporción del resto de combustibles permaneció sin cambios significativos, salvo el viento, que, como podemos ver, empezó a subir de manera relevante a partir de 2001 para alcanzar 4% en 2019. De esta manera, vemos que el cambio relevante que condujo a una reducción de emisiones en la mezcla de

GRÁFICA 7. *Exportaciones netas de electricidad (2001-2019)*

FUENTE: elaboración propia con información de Sener (2002 a 2020).

combustible fue la sustitución de los combustibles derivados del petróleo por gas natural. Las fuentes renovables, como el viento y el sol, si bien aumentaron su participación, ésta fue todavía marginal.

5. *Efecto de balanza comercial*

En cuanto al comercio internacional de electricidad, ha sido el efecto menos significativo de todos. Que este efecto haya contribuido a un incremento marginal de sólo 0.5% indica que México exportó más electricidad que la que importa, pero en cantidades muy pequeñas (gráfica 7). En efecto, salvo en 2001 y 2002, en el resto de los años del periodo analizado México fue exportador neto de electricidad, y llama la atención cómo a partir de 2012 se produjo un incremento significativo respecto de los años anteriores, aunque, insistimos, son cantidades de energía muy pequeñas en relación con el total de electricidad generada. Por ejemplo, en 2014 las exportaciones netas de electricidad alcanzaron 6 864 GWh, la mayor cantidad en el periodo, cifra que representó sólo 2% del total de electricidad generada en México en ese

año. No obstante, consideramos que el comercio internacional de electricidad, a raíz del nuevo tratado internacional entre México, los Estados Unidos y Canadá, puede convertirse en una actividad económica mucho más importante para el país, sobre todo en los estados de la frontera norte de México, debido a su proximidad geográfica con los Estados Unidos.

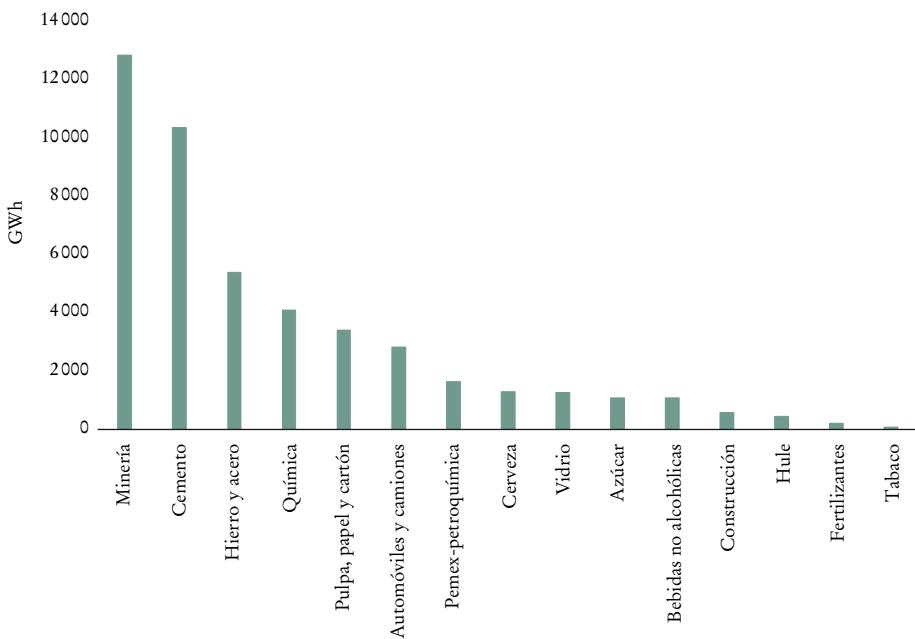
III. HACIA UNA AGENDA NACIONAL DE SUSTENTABILIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Nuestros resultados muestran que falta mucho por hacer todavía en México para que los procesos de producción y consumo de electricidad contribuyan con un verdadero desarrollo sustentable. Durante 2001-2019 el incremento procedente por el efecto de actividad —es decir, por el crecimiento del PIB— no pudo ser contrarrestado por el resto de los efectos, especialmente por los que tienen que ver con la eficiencia energética tanto de la demanda (intensidad eléctrica) como del suministro por la eficiencia de las centrales, así como con el uso de recursos renovables o combustibles menos contaminantes en el lado del suministro mediante el efecto de mezcla de combustible. En esta línea, proponemos una serie de acciones concretas a fin de sentar las bases de una agenda nacional de sostenibilidad de energía eléctrica en México.

1. Electricidad y desarrollo sustentable.

Del discurso demagógico a las acciones concretas

En primer lugar, consideramos necesario establecer metas de eficiencia energética medibles y verificables en todos los sectores económicos, pero especialmente en el sector industrial, por su participación en el consumo final de electricidad. Como lo comentamos en su momento, a pesar de que México ha impulsado la eficiencia energética como política pública desde finales de la década de los ochenta, la evidencia empírica es clara en el sentido en que todos los sectores se han vuelto más intensivos en el uso de electricidad, lo cual significa que cada vez requieren más para generar una unidad monetaria de su PIB. Ya dijimos que el sector industrial es el más importante por el peso que tiene en el consumo final total de electricidad, pero esta idea de establecer metas y objetivos debería ser más específica, a nivel de subsectores e incluso de ramas del sector industrial. En este sentido, la gráfica 8 muestra los 15 subsectores que más consumen electricidad en el sector industrial

GRÁFICA 8. *Consumo de electricidad de las principales ramas industriales en México*

FUENTE: elaboración propia con información de Sener (2002 a 2020).

(27% del total); esta información puede aprovecharse para construir escenarios base y de mitigación de emisiones en cada uno de estos subsectores.

De acuerdo con la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (Conuee), de las 34 normas oficiales de eficiencia energética vigentes (NOM), 11 son aplicables a la industria y se dividen de acuerdo con los siguientes temas: tres de iluminación, tres de eficiencia en la envolvente y aislamiento térmico en construcciones, tres de motores eléctricos, una para equipos centrales de aire acondicionado, y una en condensadoras y evaporadores para refrigeración. Al respecto, habría que investigar a mayor profundidad por qué las actividades industriales no han logrado reducir su intensidad eléctrica, y conocer si es necesario diseñar e implementar nuevas normas de eficiencia energética más rigurosas, o bien si lo que hace falta es implementar adecuadamente la normatividad oficial vigente.

Además, consideramos necesario construir indicadores de intensidad eléctrica con base en el volumen físico producido (vidrio, cemento, acero,

por ejemplo) y no sólo en valores monetarios como el PIB o el valor agregado central bruto; esto en todo el sector industrial, pero de manera especial en los 15 sectores que consumen más electricidad en México. El análisis de la intensidad eléctrica en términos físicos, de acuerdo con Reddy y Ray (2011), ofrece resultados más precisos sobre el desempeño de la eficiencia energética técnica que los que ofrece la intensidad en términos monetarios, debido a que no siempre puede asegurarse un valor monetario constante (en un año determinado), aun con el uso del factor de deflación, en todos los subsectores o ramas económicas.

Por ejemplo, las fluctuaciones de los precios de los insumos y los productos por coyunturas económicas, las diferencias de los precios de los insumos por la capacidad económica entre empresas del mismo ramo, o bien por la capacidad que tienen empresas monopólicas para fijar el precio de venta, son algunos de los problemas empíricos que afectan la capacidad de la intensidad eléctrica monetaria para medir adecuadamente el desempeño de la eficiencia técnica.

En cuanto al sector residencial, a reserva de estudios de mayor profundidad, inferimos que las normas oficiales de eficiencia energética emitidas para equipos como refrigeradores, aires acondicionados, lavadoras y lámparas fluorescentes han logrado reducir el consumo de electricidad por vivienda, como lo comprobamos en la sección anterior. No obstante, hay todo un campo de acción muy importante para lograr una mayor eficiencia en este sector, por ejemplo, con normas de construcción de viviendas energéticamente eficientes más estrictas y diferenciadas de acuerdo con las zonas climáticas del país, con el impulso al uso de lámparas LED, y con el fomento de prácticas de conservación de la energía por parte de la población. En este sentido, destacamos que el uso de tecnologías eficientes es necesario para alcanzar una mayor eficiencia en el consumo de electricidad, pero si no va acompañada de prácticas sustentables por parte de la población, puede producirse un efecto rebote que conduzca a un mayor consumo de electricidad.

En cuanto a la eficiencia de las centrales eléctricas, la cartera de proyectos de inversión de la CFE en 2022-2026 contempla que entren en operación 18 centrales termoeléctricas nuevas, 11 de ciclo combinado, dos de turbina de gas y tres de combustión interna. También comenzarán a operar una central fotovoltaica de cuatro fases y una geotérmica, y se van a modernizar y rehabilitar 10 centrales hidroeléctricas. Inferimos que la construcción y la puesta

en operación de nuevas centrales eléctricas, así como la rehabilitación de centrales existentes, seguirán conduciendo a una reducción de las emisiones, como se logró en el periodo analizado.

2. Seguridad energética

El papel que ha tomado el gas natural como el combustible más utilizado en México para generar electricidad presenta una suerte de dicotomía para el desarrollo sustentable. Si bien el factor de emisión de este combustible es menor que el del carbón y los petrolíferos, y las centrales de ciclo combinado son más eficientes que el resto de las centrales termoeléctricas, el que en la actualidad 64% de la electricidad se produzca con gas natural incrementa nuestra dependencia de este combustible y nos hace más vulnerables en términos de seguridad energética. Ante esta situación, de acuerdo con nuestros resultados, consideramos que es importante diversificar la oferta interna bruta de combustibles o energéticos utilizados para descarbonizar la generación de electricidad en México.

De acuerdo con los balances nacionales de energía (Sener, 2020), México importa dos terceras partes de la oferta interna bruta de este combustible. Las opciones de energías no contaminantes que tenemos para reducir esta alta dependencia del gas natural son la nuclear y las renovables. Para la primera, su impulso para descarbonizar la generación de electricidad es una opción polémica que se enfrentaría muy probablemente a protestas de activistas ambientales por el almacenamiento de los residuos tóxicos. En cuanto a las energías renovables, si bien la hidroenergía ha sido históricamente la más importante en México, consideramos que es muy poco probable que se produzca un incremento significativo debido a la disponibilidad variable de recursos hídricos por la presencia de fenómenos climáticos extremos (sequías). No obstante, donde sí vemos un potencial significativo de crecimiento es en las energías renovables no convencionales (fotovoltaica y eólica). Cabe destacar que en 2013 sólo se generaban 14 GWh de energía solar y en 2019 esta cantidad creció a 2 176, mientras que la electricidad generada en centrales eólicas subió de 1 759 a 12 435 GWh en el mismo periodo.

Destacamos que México tiene el potencial de convertirse en un exportador neto de electricidad renovable, sobre todo en los estados de la frontera norte, región que cuenta con uno de los mayores potenciales para la energía solar. Sólo en el desierto de Sonora, que cubre parte de los estados de Sonora,

Chihuahua y Coahuila en México, así como Arizona y California en los Estados Unidos, se alcanzan niveles de radiación que superan 7.8 kW/m² por día (Solargis, 2022). Ante estos niveles de radiación solar, que, como ya lo mencionamos, son de los más altos en el mundo, México tiene un gran potencial para generar electricidad, ya sea mediante paneles fotovoltaicos o bien con centrales de concentración solar térmica, no sólo para el comercio internacional sino también para el consumo nacional.

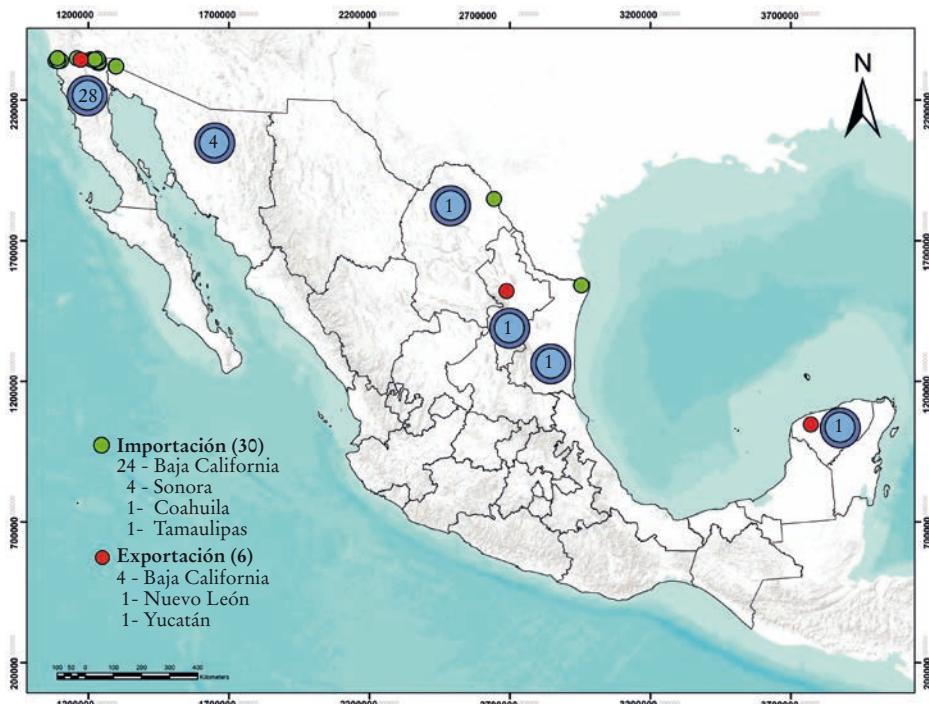
Es así que, con base en este crecimiento significativo de las energías renovables no convencionales, planteamos que es necesario seguir esta tendencia. Como lo comentamos previamente, la reducción de emisiones debida al efecto de mezcla de combustibles es todavía marginal, y para contrarrestar el incremento de emisiones por el efecto de actividad (aumento del PIB), es indispensable que se expanda mucho más la generación de electricidad renovable.

3. Comercio internacional

El efecto de balanza comercial condujo a un incremento marginal en las emisiones, ya que el balance es positivo, es decir, México exporta más electricidad de la que importa, aunque todavía en pequeñas cantidades. En la actualidad la Comisión Reguladora de Energía (CRE) ha otorgado 30 permisos de importación, todos localizados en los estados de la frontera norte de México, y cinco permisos de exportación, cuatro también en los estados de la frontera norte, y uno en Yucatán (mapa 1). No obstante, ya comentamos que, debido al tratado de comercio internacional entre México, los Estados Unidos y Canadá (TMEC), las condiciones están dadas para que se incrementen las exportaciones y las importaciones de electricidad, sobre todo el comercio internacional de electricidad renovable entre México y los Estados Unidos.

Si bien el TMEC no incluye un capítulo específico sobre la energía, aquellos que tocan reglas de origen (capítulo 4), procedimientos de origen (5), inversión (14), comercio transfronterizo de servicios (15), política de competencia (21), empresas propiedad del Estado y monopolios designados (22), medio ambiente (24), competitividad (26), buenas prácticas regulatorias (28) y solución de controversias (31) fomentan una mayor competencia e integración de los mercados energéticos de América del Norte, la participación del sector privado en la generación de electricidad acorde con la reforma ener-

MAPA 1. *Localización de las centrales de generación que exportan o importan electricidad*

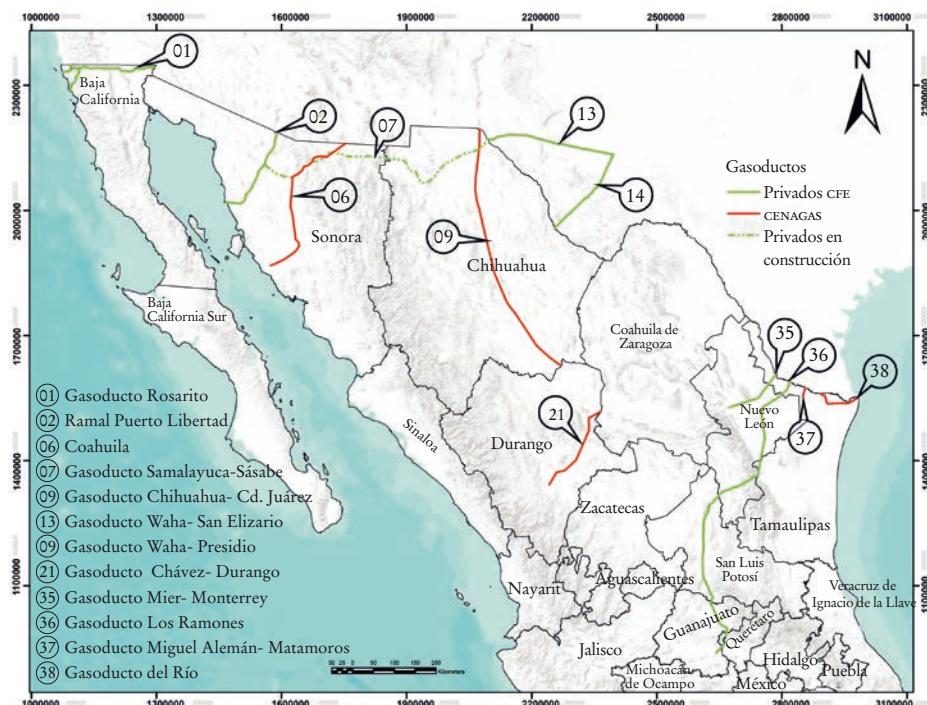


FUENTE: elaboración propia con información de la CRE (2022).

gética de 2014, y una tarifa cero para la importación de productos energéticos. Este escenario de fomento al comercio internacional está creando las condiciones para que la frontera norte de México, debido a su cercanía geográfica con los Estados Unidos y los altos niveles de radiación solar que ocurren ahí (como lo comentamos anteriormente), se convierta en una región dinámica para el comercio internacional de electricidad renovable. Por otra parte, la generación de electricidad con gas natural tiene también un alto potencial de desarrollo en los estados de la frontera de México, ya que el gas natural que importamos de los Estados Unidos se transmite por una red de gasoductos transfronterizos (mapa 2).

Respecto de este último punto, debe considerarse que la generación de electricidad con gas natural sí emite de manera directa CO₂ a la atmósfera, al

MAPA 2. *Red de gasoductos en la frontera norte de México*



FUENTE: elaboración propia con información de la CRE (2022).

contrario de la generación con renovables como sol y viento, por lo que, en caso de que se desarrolle un mayor comercio internacional con este tipo de energía y el balance comercial fuese positivo —es decir, mayores exportaciones que importaciones—, se incrementarían también las emisiones. Un posible escenario futuro de esta naturaleza nos conduce ineludiblemente a pensar en las diferentes alternativas respecto del comercio internacional de electricidad con los Estados Unidos e incluso con Centroamérica, y a responder preguntas como ¿debemos exportar exclusivamente electricidad renovable que no produce emisiones de manera directa?, ¿debemos incluir también electricidad generada con gas natural que produce emisiones?, o ¿es mejor importar electricidad cuyas emisiones se contabilicen en otro país?

IV. CONCLUSIONES

Nuestros resultados evidencian una realidad que, de acuerdo con la literatura especializada en los métodos ADI, parece una constante en la sustentabilidad de los procesos de producción y consumo de electricidad a nivel mundial. Esta constante es que las acciones y las medidas procedentes de las políticas energéticas implementadas a partir de la impronta de la sustentabilidad como alternativa de desarrollo no han producido una reducción, o al menos una estabilización, de las emisiones eléctricas. Dicho de manera más clara, para el caso mexicano la evolución de la intensidad eléctrica, así como la eficiencia y la proporción de energías renovables o menos contaminantes en la mezcla de combustible en las centrales de generación han sido insuficientes para reducir las emisiones alcanzadas por la actividad económica nacional, la cual, por cierto, se ha ralentizado en las últimas décadas, especialmente durante el periodo analizado en este trabajo.

México, al igual que todos los países del mundo, se encuentra en la etapa de pospandemia, que, aunada a la ralentización económica mencionada, está evidenciando los retos que debemos afrontar para mejorar la calidad de vida y el bienestar de la población, como lograr un desarrollo económico y social más equitativo, abatir los rezagos de educación en la niñez y juventud para adaptarnos a la nueva realidad económica global, invertir en ciencia y tecnología a fin de generar las innovaciones tecnológicas y sociales que requiere nuestro país, entre otros. Por otra parte, debemos pensar también en las acciones y las medidas a implementar para reducir los impactos ambientales globales y locales derivados de la actividad económica nacional, la cual refleja los patrones de producción y consumo de la sociedad mexicana. Para lograr todo lo anterior, será indispensable generar y consumir mayores cantidades de electricidad.

En esta línea, de acuerdo con la AIE (2022a), las emisiones eléctricas a nivel global se incrementaron en aproximadamente 53% en el periodo analizado, lo cual significa, con base en nuestros resultados, que el crecimiento de México estuvo muy por debajo del promedio mundial. Por otra parte, tomando en cuenta que México contribuye con sólo 1.1% de las emisiones eléctricas totales en el mundo (AIE, 2022a), consideramos necesario que más que adoptar acríticamente el discurso demagógicamente homogéneo sobre la sustentabilidad energética global, deberíamos quizás aplicar a plenitud el

principio de responsabilidades comunes pero diferenciadas de acuerdo con las capacidades económicas, a fin de que México ingrese a una verdadera ruta de sustentabilidad. Esta visión nos lleva a pensar en las características propias de nuestro país, de tal manera que el diseño y la implementación de las políticas energéticas nacionales —como la política de electricidad— atiendan estas particularidades. Para ello, debemos pensar en el tipo de desarrollo que queramos para México, ya sea que prioricemos el crecimiento y el desarrollo económicos, o, por el contrario, decidamos priorizar el medio ambiente, o bien, que intentemos alcanzar un desarrollo sustentable que busque un equilibrio entre ambas dimensiones.

APÉNDICE. ANEXO ESTADÍSTICO

CUADRO A1. *Información económica y energética utilizada para el cálculo de los efectos en el método IDML^a*

Año	PIB (millones de pesos 2013)	EP total (GWh)	EC total (GWh)	F _T (TJ)	Fcarb (TJ)
2001	12 880 622	209 568	209 647	2 243 255	226 991
2002	12 875 490	215 117	215 319	2 264 063	264 102
2003	13 061 719	218 612	217 730	2 281 030	307 978
2004	13 573 815	231 177	230 221	2 721 923	236 117
2005	13 887 073	231 902	230 698	2 420 796	327 454
2006	14 511 307	249 643	248 867	2 569 221	317 097
2007	14 843 826	259 531	258 357	2 527 464	314 260
2008	15 013 578	261 840	260 739	2 428 520	216 600
2009	14 219 998	261 002	260 099	2 306 210	294 830
2010	14 947 795	270 997	270 225	2 397 620	322 750
2011	15 495 334	288 835	288 138	2 466 850	349 880
2012	16 059 724	295 130	290 890	2 507 240	364 120
2013	16 277 187	296 054	290 349	2 594 530	338 410
2014	16 741 050	292 256	285 392	2 460 840	335 630
2015	17 292 358	308 850	302 130	2 531 738	335 450
2016	17 747 239	318 447	313 296	3 001 026	343 180
2017	18 122 261	328 049	322 505	2 909 240	267 940
2018	18 520 044	335 512	332 051	2 937 340	316 760
2019	18 487 338	349 602	347 987	2 759 410	284 190

^aEP = electricidad producida; EC = electricidad consumida; F_T = energía total que ingresa a la generación; Fcarb = energía que ingresa a centrales carboeléctricas.

CUADRO A1. *Información económica y energética utilizada para el cálculo de los efectos en el método IDML (continúa)^b*

<i>Año</i>	<i>Fcom (TJ)</i>	<i>Fgn (TJ)</i>	<i>Epcar (GWh)</i>	<i>Epet (GWh)</i>	<i>Epgn (GWh)</i>
2001	1 003 403	517 594	22 739	92 744	50 358
2002	870 108	659 720	25 680	79 314	69 132
2003	772 506	760 903	30 220	70 797	78 136
2004	896 891	833 180	23 431	73 932	90 223
2005	721 001	848 606	32 450	66 763	85 016
2006	594 854	1 115 203	31 500	53 853	113 613
2007	613 410	1 087 410	31 329	55 018	125 033
2008	521 530	1 091 310	20 908	52 876	131 076
2009	489 470	1 103 880	29 059	48 777	137 918
2010	461 770	1 208 930	31 938	43 763	143 515
2011	475 340	1 203 080	33 468	48 833	150 586
2012	531 070	1 215 640	33 861	55 550	153 258
2013	480 290	1 355 460	31 501	47 485	164 995
2014	333 800	1 342 080	33 503	32 725	160 840
2015	316 080	1 285 000	33 462	30 971	184 872
2016	346 496	1 734 620	34 046	33 190	190 827
2017	383 430	1 705 250	30 557	38 576	196 320
2018	350 430	1 813 370	28 685	35 751	205 150
2019	324 490	1 759 440	32 412	35 806	222 318

^b Fcom = energía que ingresa a centrales con petrolíferos; Fgn = energía que ingresa a centrales con gas natural; Epcar = electricidad producida con carbón; Epet = electricidad producida con petrolíferos; Epgn = electricidad producida con gas natural.

FUENTES: Sener (2002 a 2020) e INEGI (2021).

CUADRO A2. Factores de emisión

Combustible	Factor de emisión (tC/TJ)	Fracción oxidable	Factor de emisión incluyendo fracción oxidable (tCO ₂ /TJ)
Carbón	25.08	0.98	92.708
Coque de petróleo	27.5	0.99	99.825
Gas licuado de petróleo (GLP)	17.2	0.99	62.436
Diésel	20.2	0.99	73.326
Combustóleo	21.1	0.99	76.593
Gas natural	15.3	0.995	55.820

FUENTE: INECC (2012).

CUADRO A3

Año	Centrales de carbón (TJ/GWh)	Centrales petrolíferas (TJ/GWh)	Centrales de gas natural (TJ/GWh)
2001	9.982	10.819	10.278
2002	10.284	10.970	9.543
2003	10.191	10.912	9.738
2004	10.077	12.131	9.235
2005	10.091	10.799	9.982
2006	10.067	11.046	9.816
2007	10.031	11.149	8.697
2008	10.360	9.863	8.326
2009	10.146	10.035	8.004
2010	10.106	10.552	8.424
2011	10.454	9.734	7.989
2012	10.753	9.560	7.932
2013	10.743	10.115	8.215
2014	10.018	10.200	8.344
2015	10.025	10.206	6.951
2016	10.080	10.440	9.090
2017	8.769	9.940	8.686
2018	11.043	9.802	8.839
2019	8.768	9.063	7.914

FUENTE: elaboración propia con datos de Sener (2002 a 2020).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIE (2022a). Consumo de electricidad por sector. París: AIE. Recuperado de: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=ElecConsBySector>

AIE (2022b). Emisiones de CO₂ por sector. París: AIE. Recuperado de: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser?country=WORLD&fuel=CO2%20emissions&indicator=CO2BySector>

Ang, B. W., y Choi, K. H. (1997). Decomposition of aggregate energy and gas emission intensities for industry: A refined Divisia index method. *The Energy Journal*, 18(3), 59-74.

Ang, B. W., y Liu, F. L. (2001). A new energy decomposition method: Perfect in decomposition and consistent in aggregation. *Energy*, 26(6), 537-548. Recuperado de: [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(01\)00022-6](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(01)00022-6)

Ang, B. W., y Su, B. (2016). Carbon emission intensity in electricity production: A global analysis. *Energy Policy*, 94, 56-63. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.03.038>

Ang, B. W., y Zhang, F. Q. (2000). A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies. *Energy*, 25(12), 1149-1176. Recuperado de: [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(00\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(00)00039-6)

Borenstein, S. (2015). A microeconomic framework for evaluating energy efficiency rebound and some implications. *Energy Journal*, 36(1), 1-21. Recuperado de: <https://doi.org/10.5547/01956574.36.1.1>

Bryce, R. (2020). *A Question of Power. Electricity and the Wealth of Nations*. Nueva York: BBS Public Affairs.

CRE (2022). Datos abiertos. Permisos en materia de importación y exportación de energía eléctrica. Recuperado de: https://datos.gob.mx/busca/dataset?q=Electricidad&theme=Energ%C3%ADa+Y+Medio+Ambiente&sort=score+desc%2C+metadata_modified+desc&page=2

Díaz-Bautista, A. (2005). *El cambio estructural y la regulación del sector eléctrico mexicano*. Múnich: Industrial Organization. Recuperado de: <https://ideas.repec.org/p/wpa/wuplio/0504011.html>

Ehrlich, P., y Holdren, J. (1971). Impact of population growth: Complacency concerning this component of man's predicament is unjustified and

counterproductive. *Science*, 171(3977), 1212-1217. Recuperado de: <https://doi.org/10.1126/science.171.3977.1212>

INECC (2012). *Actualización del inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010, para las categorías de energía y procesos industriales*. México: INECC.

INEGI (2021). Sistema de cuentas nacionales. Producto interno bruto (PIB) - trimestral. Base 2013. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/programas/pib/2013/>

INEGI (2022). Banco de Información Económica (BIE). Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/?tm=0>

IPCC (2019). *Calentamiento global de 1,5 °C. Resumen para responsables de políticas. Resumen técnico*. Nueva York: ONU. Recuperado de: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_spanish.pdf

Karmellos, M., Kopidou, D., y Diakoulaki, D. (2016). A decomposition analysis of the driving factors of CO₂ (Carbon dioxide) emissions from the power sector in the European Union countries. *Energy*, 94, 680-692. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.145>

Kaya, Y. (1989). *Impact of Carbon Dioxide Emission Control on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios* (IPCC Response Strategies Working Group, May). Nueva York: ONU.

Malla, S. (2009). CO₂ emissions from electricity generation in seven Asia-Pacific and North American countries: A decomposition analysis. *Energy Policy*, 37(1), 1-9. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.08.010>

Oliveira, P. M. de (2019). Effect of generation capacity factors on carbon emission intensity of electricity of Latin America & the Caribbean, a temporal IDA-LMDI analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 516-526. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.030>

Reddy, B. S., y Ray, B. K. (2011). Understanding industrial energy use: Physical energy intensity changes in Indian manufacturing sector. *Energy Policy*, 39(11), 7234-7243. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.08.044>

Sener (2002). *Balance nacional de energía 2001*. México: Sener.

Sener (2003). *Balance nacional de energía 2002*. México: Sener.

Sener (2005). *Balance nacional de energía 2004*. México: Sener.

Sener (2007). *Balance nacional de energía 2006*. México: Sener.

Sener (2009). *Balance nacional de energía 2008*. México: Sener.

Sener (2011). *Balance nacional de energía 2010*. México: Sener.

Sener (2013). *Balance nacional de energía 2012*. México: Sener.

Sener (2015). *Balance nacional de energía 2014*. México: Sener.

Sener (2017). *Balance nacional de energía 2016*. México: Sener.

Sener (2019). *Balance nacional de energía 2018*. México: Sener.

Sener (2020). *Balance nacional de energía 2019*. México: Sener.

Sener (2021). *Balance nacional de energía 2020*. México: Sener.

Shrestha, R. M., Anandarajah, G., y Liyanage, M. H. (2009). Factors affecting CO₂ emission from the power sector of selected countries in Asia and the Pacific. *Energy Policy*, 37(6), 2375-2384. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.01.032>

Shrestha, R. M., y Timilsina, G. R. (1996). Factors affecting CO₂ intensities of power sector in Asia: A Divisia decomposition analysis. *Energy Economics*, 18(4), 283-293. Recuperado de: [https://doi.org/10.1016/S0140-9883\(96\)00019-9](https://doi.org/10.1016/S0140-9883(96)00019-9)

Smil, V. (2021). *Energy and Civilization. A History*. Barcelona: Arpa.

Solargis (2022). Global Solar Atlas. 2019. Recuperado de: <https://globalsolaratlas.info/map?c=31.653381,-118.828125,3&s=29.993002,-111.09375&m=site>

Steenhof, P. A., y Weber, C. J. (2011). An assessment of factors impacting Canada's electricity sector's GHG emissions. *Energy Policy*, 39(7), 4089-4096. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.03.056>

Zhang, M., Liu, X., Wang, W., y Zhou, M. (2013). Decomposition analysis of CO₂ emissions from electricity generation in China. *Energy Policy*, 52, 159-165. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.10.013>