



Munich Personal RePEc Archive

Impact of the Effect of Greenhouse Gas Pollutants on Economic Growth in 86 Countries (1990-2019): On the inverse Kuznets Curve

Torres-Brito, David Israel and Cruz-Aké, Salvador and Venegas-Martínez, Francisco

Instituto Politécnico Nacional, México, Instituto Politécnico Nacional, México, Instituto Politécnico Nacional, México

2 November 2023

Online at <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/119031/>
MPRA Paper No. 119031, posted 03 Nov 2023 09:22 UTC

Impacto de los contaminantes por gases de efecto invernadero en el crecimiento económico en 86 países (1990-2019): Sobre la curva inversa de Kuznets

(Impact of the Effect of Greenhouse Gas Pollutants on Economic Growth in 86 Countries (1990-2019): On the inverse Kuznets Curve)

David Israel Torres-Brito
Instituto Politécnico Nacional, México
darvid.torres@gmail.com

Salvador Cruz-Aké
Instituto Politécnico Nacional, México
scrusa@ipn.mx

Francisco Venegas-Martínez
Instituto Politécnico Nacional, México
fvenegas1111@yahoo.com.mx

Resumen

La presente investigación indaga en la relación entre emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y crecimiento económico; en particular, busca medir el impacto de estas emisiones en el Producto Interno Bruto (PIB), a partir de la identificación de las fuentes contaminantes y sus costos asociados, mediante la construcción de un panel de datos anuales para 86 países distribuidos en 4 niveles de ingreso y 6 regiones, a través del periodo de 30 años 1990-2019. La relación de interés se contextualiza en un marco de estructura de mercado, por lo que se consideran datos del crecimiento de los sectores más grandes de la economía, así como datos demográficos para cada país y año. También se toma la información del mercado energético, así como la participación de los recursos renovables en este, y la generación de energía por tipo de combustible. A su vez, se explora la relación entre ingreso y la participación de los recursos naturales en la economía, con lo que se identifica la eficiencia energética y el aprovechamiento de los recursos como *proxy* de la tecnología disponible para cada grupo de ingreso. Además de un análisis exploratorio (descriptivo) de los datos, se emplea un modelo de regresión cuantílico para datos de panel con efectos fijos aditivos (QRPD), el cual es un caso especial del estimador de regresión cuantílica generalizado (GQR). En el uso del modelo se aplica el método de optimización adaptativa de Montecarlo basado en cadenas de Markov (MCMC). Se verifica la hipótesis de la investigación tanto a nivel descriptivo como econométrico: una relación inversa entre crecimiento económico y emisiones de GEI. Se devela una curva ambiental de Kuznets, al observarse que las emisiones de GEI se incrementan a mayores niveles de ingreso de los países, pero alcanzan un punto de inflexión, de modo que los países de ingreso alto emiten menores emisiones de CO₂eq que el resto. Asimismo, el modelo estimado revela que las emisiones de GEI contribuyen de manera positiva en el crecimiento económico, pero en el largo plazo, al considerar la variable cuadrática, se alcanza un punto de inflexión a partir del cual las emisiones

presentan un estimador negativo. También se identifica una curva tecnológica de Kuznets (CTK) a partir del análisis de la eficiencia energética de cada grupo de ingreso, la cual responde al desarrollo tecnológico, cambios en la estructura económica internacional y la caída en los precios de las energías limpias.

Clasificación JEL: Q53, F43, F46, C50.

Palabras clave: Gases de Efecto Invernadero, Crecimiento económico, Curva Ambiental de Kuznets, Datos de panel, Regresión cuantílica.

Abstract

This research inquires into the relationship between greenhouse gas emissions (GHG) and economic growth; in particular, it seeks to measure the impact of these emissions on the Gross Domestic Product (GDP), based on the identification of polluting sources and associated costs, through the construction of an annualized data panel for 86 countries distributed in 4 income levels and 6 regions, through the 30-year period 1990-2019. The relationship of interest is contextualized within a market structure framework, for which there were taken growth rates for each major economic sector, as well as demographic data for each country and year. Information on the energy market is also considered, including the share of renewable resources and the generation of energy by type of fuel, which helps to identify the efficiency of energy consumption and use of natural resources as a proxy of technology availability by income group. In addition to an exploratory (descriptive) analysis of the data, a quantile regression model for panel data with additive fixed effects (QRPD) is used, as a special case of the generalized quantile regression (GQR) estimator. In the use of the model, the adaptive optimization of Markov chain Monte Carlo Method (MCMC) is applied. The research hypothesis is verified both at a descriptive and econometric level: an inverse relationship between economic growth and GHG emissions. An Environmental Kuznets curve is observed (EKC), revealing that GHG emissions increase with income levels reaching a turning point, so that high-income countries emit fewer CO₂eq emissions than the rest. Likewise, the estimated model reveals that GHG emissions contribute positively to economic growth, but in the long term, by considering the quadratic variable, a turning point is reached from which emissions present a negative estimator. Finally, a Kuznets technology curve (CTK) is also identified from the energy efficiency analysis of each income group that responds to technological development, changes in the international economic structure and the drop in clean energy prices.

JEL Classification: Q53, F43, F46, C50.

Keywords: Greenhouse Gases, Economic Growth, Environmental Kuznets curve, Panel data, Quantile regression.

1. Introducción

La presente investigación tiene como principal objetivo medir el impacto de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el crecimiento económico. La relación entre CO₂ y variables económicas, incluyendo el consumo energético, el nivel de urbanización, así como el uso de energías renovables y no renovables, se ha estudiado profundamente a nivel regional y

nacional (ver Salazar-Núñez et al., 2021; Santillán-Salgado et al., 2020; Valencia-Herrera et al., 2020) con justa razón, a nivel internacional, existen compromisos de reducir las emisiones de GEI y por ello es necesario abordar el problema a profundidad para determinar las causas subyacentes que expliquen esta relación; con la presente investigación buscamos exponer las condiciones económicas que permitirían cumplir con los compromisos ambientales y conocer los incentivos económicos existentes para realizar los ajustes necesarios en su estrategia energética y ambiental. Nuestra hipótesis es que existe una relación inversa entre el crecimiento económico y la emisión de gases de efecto invernadero.

La relación entre crecimiento económico y la protección del medio ambiente atrajo atención considerable desde los años sesenta (Chen et al., 2019). El primer estudio sistemático a gran escala sobre la relación entre crecimiento económico y calidad ambiental fue el trabajo de Grossman y Krueger (1991), en el que se examinaron los impactos ambientales del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN).

Críticos ambientalistas y economistas sospechaban que el crecimiento económico obtenido por el TLCAN aumentaría los costos ambientales más rápido que los beneficios de la producción derivado del comercio internacional, esta situación —decían— resultaría en condiciones económicas no deseables (ver Daly, 1993). En respuesta a la crítica, Grossman y Krueger plantearon que un mayor crecimiento mejoraría la calidad ambiental de México en lugar de reducirla, y, para respaldar su argumento, llevaron a cabo un análisis empírico de la relación entre los niveles de contaminación ambiental y el ingreso per cápita en áreas urbanas de 42 países. Este análisis encontró que las concentraciones de varios contaminantes alcanzaron su punto máximo cuando cada país alcanzó aproximadamente el nivel de ingreso per cápita de México en ese momento (ver Grossman y Krueger, 1991).

Similarmente, Panayotou (1993), al utilizar datos transversales sobre deforestación y contaminación del aire de una muestra de países desarrollados y en desarrollo, encontró respaldo para la hipótesis de una relación en forma de U invertida a la que denominó curva ambiental de Kuznets (CAK); le dio este nombre porque su representación gráfica describe un comportamiento análogo al observado por Simon Kuznets (1955) entre desigualdad y desarrollo.

La hipótesis de la CAK sostiene que en las primeras etapas del crecimiento económico aumentan tanto la degradación como la contaminación, pero a partir de cierto nivel de ingreso per cápita la tendencia se invierte, de modo que en niveles de ingreso alto el crecimiento económico conduciría a una mejora ambiental (D. I. Stern, 2004); es por este comportamiento que se infiere la forma de U invertida. Dasgupta et al. (2002) ofrecen una breve interpretación del porqué de esta relación, sugieren que en la primera etapa de industrialización las economías se preocupan más por el producto que por preservar los recursos naturales, además de que aún no existen las condiciones para que la reducción contaminante sea costeable y la regulación ambiental aún se encuentra débil. Esta situación cambia en el grado en que se incrementan los ingresos, con lo que los sectores líderes adoptan medidas más limpias, la población valora más el medio ambiente y mejora la eficiencia institucional de regulación. A lo largo de la curva, la contaminación se estabiliza en el rango de ingresos medios y luego cae hacia los niveles preindustriales en las sociedades ricas. (Dasgupta et al., 2002, p. 147).

A partir del trabajo pionero de Grossman y Krueger la literatura sobre la CAK se desarrolló rápidamente; como lo puntualiza D. I. Stern (2017), fue el Banco Mundial (1992) quien popularizó la CAK con su Informe sobre el Desarrollo Mundial. Al poco tiempo, diversos autores comenzaron a realizar estimaciones para diferentes contaminantes, así como para otros países y regiones, y en la mayoría de los casos encontraron relaciones similares cuando se analizaron contaminantes locales con bajos costos de abatimiento. Pasten (2012) cita algunos ejemplos de estos estudios sobre emisiones de dióxido de azufre (SO₂) (ver Cole et al., 1997; Kaufmann et al., 1998; Panayotou, 1997; Shafik, 1994; Shafik y Bandyopadhyay, 1992), dióxido de carbono (CO₂), nitratos, energía y volúmenes de tráfico (ver Holtz-Eakin y Selden, 1995).

A pesar de la vasta literatura y el soporte que ha tenido la CAK, los resultados no son indiscutibles, especialmente cuando se entiende como un fenómeno empírico general del que se espera que ocurra con todos los contaminantes. Algunas críticas tempranas incluyen Ansuategi et al. (1998), Arrow et al. (1996), Copeland y Taylor (2004), Ekins (1997), Pearson (1994), y D. I. Stern (1998).

En línea con los escépticos, D. I. Stern (2004) asegura que “la mayor parte de la literatura sobre la CAK es económicamente débil” (p. 1420). También señala que en el mejor de los casos, “el modelo CAK es solo una explicación parcial de la evolución de la contaminación a lo largo del tiempo” (2018, p. 5). Para comprender la crítica, podemos ilustrarnos en el desarrollo citado de D. I. Stern, quien plantea el modelo de regresión estándar de la CAK como sigue:

$$\ln E_{it} = \alpha_i + \gamma_t + \beta_1 \ln Y_{it} + \beta_2 (\ln Y_{it})^2 + \varepsilon_{it}$$

donde E es la calidad ambiental o las emisiones por persona, Y es el producto interno bruto (PIB) per cápita, y ε es un término de error aleatorio. Los dos primeros términos en el lado derecho de la ecuación son parámetros de intersección que varían a través de países o regiones i , entre años t , los que se denominan efectos de país y de tiempo, respectivamente. El supuesto es que, aunque el nivel de emisiones per cápita puede diferir entre países a cualquier nivel de ingresos en particular, la elasticidad de las emisiones con respecto al ingreso es la misma en todos los países para un nivel de ingresos dado. Las intersecciones temporales específicas permiten tener en cuenta las variables omitidas que varían en el tiempo y los choques estocásticos que son comunes a todos los países.

El nivel de ingresos del “punto de inflexión”, donde las emisiones o concentraciones son máximas, se puede encontrar utilizando la siguiente fórmula:

$$\tau = \exp(-0.5\beta_1/\beta_2)$$

Sin embargo, de acuerdo con D. I. Stern, existe evidencia de que la ecuación anterior, para encontrar el punto de inflexión, es un modelo demasiado simple y que otras variables omitidas son importantes para explicar el nivel de emisiones.

Desde su desarrollo original y en vista de la crítica, se han planteado mejoras al modelo para poner a prueba la hipótesis de la CAK, y los investigadores han realizado aplicaciones

bastas con distintas metodologías, las cuales pueden ser clasificadas en dos grandes grupos, a saber, en análisis de series de tiempo y análisis de datos de panel.

El análisis de series de tiempo generalmente representa el estudio para un solo país, mientras que el análisis de datos de panel permite simplificar la CAK para un grupo de países. Un panorama amplio de la literatura se encuentra en el trabajo de Bilgili et al. (2019) quienes llevaron a cabo una revisión extensa de publicaciones y resumen la metodología, la cual incluye modelos como mínimos cuadrados ordinarios (MCO), retardo distribuido autorregresivo (ARDL), MCO dinámicos (DOLS), método de los momentos generalizado (GMM), mínimos cuadrados parciales (PLS), método de corrección de errores vectoriales (MCVE), entre otros.

La sección 1 se desarrolla en cuatro temas en los que se presenta una revisión general de la literatura de las teorías, metodologías y estudios empíricos llevados a cabo para la investigación de la relación entre economía y medio ambiente; se hace énfasis en el vínculo entre las emisiones de GEI y el crecimiento económico, y se mencionan consideraciones breves de estos aspectos para la economía de México. La sección 2 realiza una breve revisión de la literatura. La sección 3 está dedicada a desarrollar el marco teórico. La sección 4 examina los incentivos económicos que tienen países como México, un país de ingreso medio alto, sobre la reducción de emisiones de GEI, con base en la estructura del mercado interno. Para ello, se parte de la reseña general de los acuerdos internacionales a los que el país se ha comprometido en materia ambiental, y en específico, a la reducción de emisiones de GEI. Asimismo, realizamos una revisión general de la legislación en materia ambiental y energética que México ha implementado para cumplir con sus obligaciones de reducción de emisiones. También se puntualiza la estructura del sector energético del país. La sección 5 se presentan los datos, se realiza un análisis exploratorio para alcanzar conclusiones iniciales, y se emplea un modelo de regresión cuantíl para datos de panel con efectos fijos no aditivos, con el fin de comprobar o rechazar la hipótesis; con esta exploración y análisis se pretende analizar los factores clave que expliquen la relación entre las emisiones de GEI y el crecimiento económico, con lo que se analiza la importancia de la estructura económica y observamos sus efectos; en el modelo utilizamos datos de una muestra de 86 países que se distribuyen en 4 niveles de ingreso y 6 regiones, a través de datos anuales para el periodo 1990-2019. En la sección 6 se presenta la especificación econométrica de la curva inversa de Kuznets y los resultados obtenidos. Por último, en la sección 7 se presentan las conclusiones generales de la investigación.

2. Breve revisión de la literatura

Bhattacharya (2019) realizó una revisión de estudios empíricos llevados a cabo entre 1991 y 2006 en los que se examina la relación entre el ingreso per cápita y emisiones de CO₂, SO₂, entre otros contaminantes (ver Tabla 1). De esta exploración concluye que, aunque la literatura sobre la hipótesis de la CAK ha crecido en las últimas tres décadas, no se han extraído conclusiones concretas. Ya desde finales de los años 90, Vogel (1999) advertía que estudiar la relación entre contaminación y crecimiento económico sería una tarea desafiante.

Por lo anterior, observamos que no existe un consenso sobre la existencia de una relación en forma de U invertida entre emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) e ingreso per cápita, al menos no del modo en que lo describe la hipótesis de la CAK. Como mencionamos,

existen diferencias en metodología, periodos de investigación y el país o regiones contemplados que necesariamente implican resultados divergentes, aunque los mismos no deberían ser críticos.

Tabla 1. Visión general de la literatura empírica de la CAK entre 1991 y 2006

Autor (es)	Indicadores ambientales	Variables principales	Periodo (s) de estudio	Técnicas econométricas	Descubrimientos importantes
(Grossman & Krueger, 1991)	SO2, humo, masa de partículas en suspensión	PIB per cápita	1988, países del TLCAN	Modelo de efectos aleatorios	Para SO2, humo, se sigue una forma de U invertida
(Shafik & Bandyopadhyay, 1992)	Deforestaciones, CO2 per cápita, agua	PIB per cápita, una tendencia temporal	149 países, 1961-86	Datos de panel, modelo de efectos fijos	CO2, aumentando monótonamente
(Panayotou, 1993)	SO2, NOX, total de partículas suspendidas (SPM) y deforestación	PNB per cápita, población	Mediados de la década de 1980, 50 países en desarrollo y desarrollados	Estimación MCO	Forma de U invertida
(Holtz-Eakin & Selden, 1995)	CO2 per cápita	PIB per cápita	130 países, 1951-86	Datos de panel, modelo de efectos fijos	Forma U cuadrática invertida, N-normal cúbica
(de Bruyn et al., 1998)	Emisión de azufre	PIB per cápita	Datos de 1990 a objetivo de previsión para 2000, países LRTAP ¹ y Estados Unidos	MCO	Mayor reducción para países de altos ingresos
(Suri & Chapman, 1998)	Emisiones de la manufactura comercial	PIB per cápita, cuotas de exportación e importación de la industria manufacturera	33 países, 1971-91	Datos del panel, Mínimos Cuadrados Generalizados Factibles (FGLS)	Las exportaciones de manufacturas de los países industrializados tienen un efecto de mejora en las emisiones, mientras que las importaciones de manufacturas de los países industrializados han contribuido a la

¹ Contaminación atmosférica transfronteriza de largo alcance (LRTAP, por sus siglas en inglés).

					pendiente descendente
(Cole, 2004)	CO2 per cápita; 9 contaminantes más; contaminantes antes del agua	PIB per cápita, intensidad del comercio, participación de las exportaciones e importaciones en contaminación intensiva en el comercio, participación de la industria manufacturera	21 países de la OCDE, 1980-87	Datos de panel; modelos de mínimos cuadrados generalizados, aleatorios y de efectos fijos	Forma de U invertida para CO2, para otros contaminantes tanto forma de U invertida como forma de N.
(Martínez-Zarzoso & Bengochea-Morancho, 2004)	Emisiones de CO2	PIB per cápita	22 países de la OCDE, 1975-98	Cuadrados medios agrupados	Relación tanto en forma de U invertida como en forma de N para las emisiones de CO2
(Dinda & Coondoo, 2006)	CO2 per cápita	PIB per cápita, una tendencia temporal	88 países, 1960-90	Datos del panel, cointegración, prueba de corrección de errores	Relación bidireccional
(Richmond & Kaufmann, 2006)	Emisiones de carbón	PIB per cápita	Panel de la OCDE y países no miembros de la OCDE	MCO agrupados y cointegración de paneles	Soporte limitado de forma de U invertida para Países de la OCDE, relación positiva entre ingresos-emisiones de carbono para países no miembros de la OCDE

Fuente: Elaboración propia con Bhattacharya, 2019.

Inglesi-Lotz (2019) explica que los países, así como las regiones (grupos de países), tienen características socioeconómicas y ambientales particulares que potencialmente afectan la relación entre las emisiones de GEI y el crecimiento económico. Estos resultados están en línea con el trabajo de Ansuategi y Escapa (2002) quienes advierten que la acción de cada gobierno tiene un papel clave en la determinación del impacto de la actividad económica en la calidad del ambiente.

Por tanto, resulta claro que la mejor manera de determinar si se observa o no una CAK para cierto país o región, en un periodo de interés, es llevando la hipótesis a la prueba, es decir, modelando el caso de interés, a pesar de anticipar una hipótesis generalizada. Recordemos que

para dicha tarea contamos con suficientes métodos de modelación que nos permiten comprobar o rechazar la hipótesis.

En el caso de México se han realizado estudios que confirman una CAK para distintos periodos y emisores de contaminantes. Por ejemplo, Kochi y Medina López (2013) analizaron un panel de datos para el periodo 1999-2005, y encontraron una relación en forma de U invertida persistente entre el PIB per cápita y los niveles de emisión de SO₂ per cápita.

A su vez, Arévalo Pacheco (2017) estimó la CAK para México mediante mínimos cuadrados ordinarios utilizando datos de 1960 a 2016, hallando que las emisiones de CO₂ y el PIB per cápita muestran estimadores positivos. También concluye que, si México llega a un nivel de estabilidad económica, la degradación del ambiente debería mostrar una tendencia a disminuir. De la misma manera, Navarrete et al. (2009) utilizando datos de 1980 a 2004, indican que, aunque se verifica la hipótesis de la CAK para México, se desconocen los mecanismos de transmisión y abren la puerta a que otras investigaciones aborden el detalle de por qué se presenta tal relación.

Similarmente, Pérez-Cirera et al. (2018) probaron el modelo típico de Kuznets y concluyeron que, al aumentar el ingreso de los hogares mexicanos, se presenta una relación cuadrática que confirma la CAK para emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x), mientras que las emisiones de monóxido de carbono (CO) y de CO₂ presentan una relación creciente.

Es a partir de los resultados empíricos 0064e los múltiples estudios que distintos autores han construido el modelo teórico que busca formalizar la hipótesis de la CAK. De esto, debemos puntualizar que cada modelo debería abordar al menos los aspectos generales observados de la evidencia empírica. Kijima et al. (2010) categorizan los modelos teóricos en dos grupos: modelos estáticos y modelos dinámicos.

Por un lado, los modelos estáticos se pueden subclasificar en aquellos que consideran una función de utilidad de un agente representativo o aquellos que toman una función de bienestar social que se busca maximizar; estos últimos, a su vez, se ramifican dependiendo de si incluyen funciones de producción, como en el caso de López (1994) y Tahvonen y Kuuluvainen (1993), o si trabajan únicamente con funciones de utilidad, como en McConnell (1997). Por otro lado, la mayoría de los modelos dinámicos (p.ej., Brock y Taylor, 2004) asumen una producción macroeconómica y analizan la dinámica de la contaminación en su trayectoria óptima. Para ilustrarnos a continuación presentamos el marco general de la literatura teórica de la CAK como lo establecen Pasten y Figueroa B. (2012).

3. Marco Teórico

Suponemos que las preferencias del agente económico representativo están dadas por la siguiente función de utilidad:

$$U = U(C, P)$$

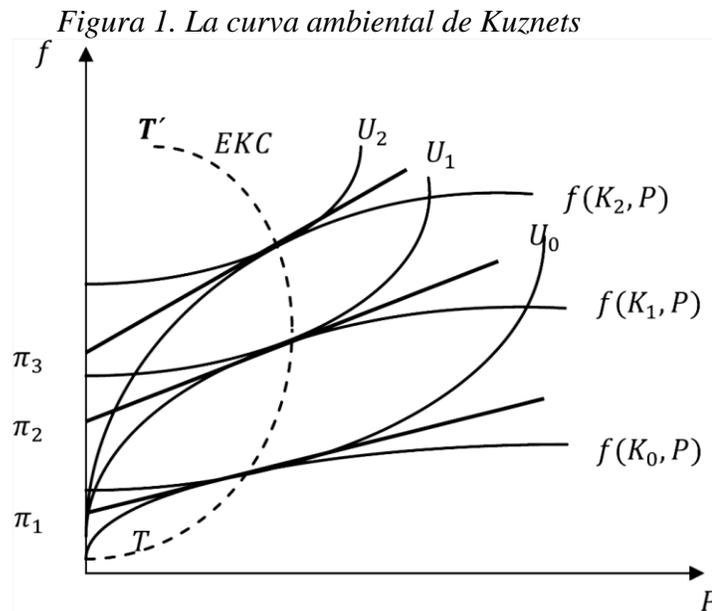
donde C es el consumo y P la contaminación. La función es creciente en C y decreciente en P , y se asume que es estrictamente cóncava para ambos factores. La función de producción se define de modo que se aíslan las preferencias de la tecnología:

$$C = f = f(K, P)$$

donde el consumo agregado (C) es igual al ingreso agregado f , K es el capital, y P es el flujo de contaminación generado en el proceso productivo. La función de producción posee las propiedades usuales de una función de producción neoclásica, i.e., es creciente, cóncava, satisface las condiciones de Inada, etc. Cuando el agente representativo determina un nivel de contaminación P óptimo obtenemos que la tasa marginal de sustitución (TMS) de la contaminación y el consumo es igual al producto marginal de la contaminación dada por $f_p = \frac{\partial f}{\partial P}$, esto es:

$$h(C, P) \equiv -\frac{U_P(C, P)}{U_C(C, P)} = f_p(K, P) \quad (1)$$

donde los subíndices representan derivación parcial.



Fuente: Pasten y Figueroa B. (2012).

En la figura 1, la condición (1) se ilustra mediante los puntos de tangencia de funciones de utilidad U_i y de producción f_i , cuya pendiente es igual a la pendiente de las rectas π_i que corresponden al precio relativo π entre ambiente limpio y el consumo bajo una internalización completa de la externalidad (contaminación). La curva punteada que pasa por los puntos T y T' representa la CAK cuando se maximiza el bienestar social.

Muchas investigaciones han establecido un consenso sobre la amenaza del cambio climático. Sin embargo, políticos y periodistas suelen sugerir que la comunidad económica duda en apoyar políticas climáticas ambiciosas debido al costo asociado, pero tales alegaciones son falsas ya que, de hecho, existe un consenso entre economistas respecto a la preocupación de los daños económicos del cambio climático como se describe en la encuesta diseñada por Howard y Sylvan (2015).

Por otra parte, Tol (2018) puntualiza que desde el trabajo fundacional de Nordhaus (1977) y otros economistas como D'Arge (1979) y Schelling (1992) en economía y medio ambiente, se ha aceptado ampliamente que el cambio climático es, en general, una externalidad negativa y se ha reforzado la idea de asignar un precio —que debería ser gravado— a las emisiones de GEI; debido a que el daño causado por la emisión de GEI no se refleja en el precio de los combustibles fósiles se considera una externalidad económica.

En el mismo sentido, N. Stern (2008) describe las emisiones de GEI como externalidades económicas negativas y —de manera contundente— afirma que representan “la mayor falla de mercado que ha visto el mundo” (p. 1). También expone que el dióxido de carbono es especialmente importante, ya que representa alrededor de las tres cuartas partes del efecto de calentamiento global generado por actividades antropogénicas.

De la misma manera, Nordhaus (2017a) asegura que el concepto económico más importante en la economía del cambio climático es el costo social del carbono (CSC), término que designa una estimación del valor marginal (medido en unidades monetarias) del impacto causado por la emisión de una tonelada adicional de CO₂ para un tiempo determinado; esto implica que medir el CSC permite asignar un precio a las emisiones de GEI, a partir de lo cual es posible definir un impuesto por unidad de emisiones, lo que resulta útil al promover su reducción; en México, por ejemplo, se utiliza el precio del carbono como un instrumento político clave, presentado como un impuesto al carbono (Altamirano y Martínez, 2017), i.e. el Impuesto Especial sobre Producción y Servicios (IEPS) para combustibles fósiles.

El CSC también puede interpretarse como el beneficio marginal de reducir las emisiones de carbono en una tonelada (Panel Intergubernamental del Cambio Climático [IPCC, por sus siglas en inglés], 2007, p. 821)². En una definición más precisa, el CSC es el cambio en el valor descontado del bienestar económico de una unidad adicional de emisiones de CO₂ equivalente (Nordhaus, 2017a).

El propósito de asignar un precio a una tonelada de CO₂ emitido busca auxiliar en la toma de decisiones de política pública en materia ambiental, en particular, para evaluar si las políticas que buscan reducir las emisiones de GEI están debidamente justificadas. Watkiss y Hope (2011) enumeran los principales usos potenciales de medir el CSC para las deliberaciones normativas:

² El IPCC es el organismo de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) para la evaluación de la ciencia relacionada con el cambio climático.

1. En la evaluación de políticas, la evaluación de impacto regulatorio y el análisis de costo-beneficio (ACB), para proporcionar los costos económicos de las políticas que aumentan las emisiones, o los beneficios económicos de las políticas que reducen las emisiones.
2. Proporcionar valores para establecer impuestos o cargos, para proporcionar el nivel de precios adecuado.
3. Proporcionar los beneficios económicos de la política de mitigación en la evaluación regulatoria, es decir, para los objetivos de política climática predefinidos que se hayan establecido a través de enfoques políticos o científico-preventivos.
4. En el análisis de la vía óptima para políticas de mitigación, al comparar estimaciones de CSC con los costos marginales de mitigación.

De acuerdo con Clarkson y Deyes (2002), los estudios llevados a cabo con el fin de medir el CSC han abordado el problema desde —principalmente— dos enfoques distintos. Por una parte, se ha estudiado desde el enfoque de ACB y por la otra, el enfoque del costo marginal (CM).

Por un lado, el enfoque del CM implica calcular directamente la diferencia en los niveles de daños futuros causados por un cambio marginal con respecto al nivel actual de emisiones. En contraste, con el enfoque ACB se busca calcular el nivel al que el costo marginal de reducir las emisiones es igual al daño marginal o —de forma equivalente— a los beneficios marginales de la reducción. Este último es al que Mandell (2011) desagrega en dos métodos, el ya mencionado CSC y el precio sombra de la política de carbono, a los que llama “enfoque directo” y “enfoque indirecto”, respectivamente (p. 888).

Hanley (2001) argumenta que la principal fortaleza del ACB como técnica de evaluación es como prueba de eficiencia económica en la asignación de recursos, ya que los ajustes en políticas actuales o propuestas imponen costos significativos a la sociedad, por lo que es importante que los tomadores de decisiones sepan si los beneficios son proporcionales. Adicionalmente, el ACB es útil porque admite la incorporación de valores sociales en la toma de decisiones y permite que los efectos ambientales se integren con los efectos financieros.

El ACB es una herramienta utilizada ampliamente para el análisis de políticas y proyectos, por lo que resulta natural que usuarios hayan buscado incorporar los impactos ambientales en este tipo de análisis para mejorar la calidad de la toma de decisiones del gobierno y autoridades en materia ambiental. Sin embargo, existen una serie de complicaciones técnicas cuando se busca aplicar el ACB a problemas ambientales.

Por su parte, Clarkson y Deyes (2002) advierten sobre los problemas que el investigador puede encontrar al momento de estimar el CSC, los cuales clasifican en dos grupos: incertidumbre científica e incertidumbres asociadas con la valoración económica.

A partir de los diversos enfoques y las consideraciones mencionadas arriba es preciso plantear la pregunta de cuál sería una evaluación satisfactoria del CSC. Pindyck (2013) responde al cuestionamiento estipulando que la mejor forma de estimar el CSC es mediante Modelos de Evaluación Integrada (MEI), los cuales son modelos que integran un modelo climatológico con un modelo económico, con lo que se obtiene una perspectiva que comprende tanto la descripción

de emisiones de GEI y su impacto en la temperatura, con proyecciones de costos de reducción, como una descripción de cómo los cambios en el clima afectan la producción, el consumo y otras variables económicas.

Uno de los fundadores en el desarrollo de modelos MEI aplicados al cambio climático es Nordhaus (1991, 1993a, 1993b) quien inicialmente utilizó un modelo simple de energía y clima Nordhaus (1975, 1977) el cual fue desarrollado hasta finalmente consolidarse en el Modelo Dinámico Integrado de Economía y Clima (DICE, por sus siglas en inglés). Nordhaus detalla la evolución del DICE desde su concepción en 1992 hasta la actualidad en Nordhaus (2017b).

En concreto, el modelo DICE es un modelo de optimización dinámica no lineal con restricciones sobre un horizonte infinito³. A continuación, exponemos el modelo básico como se presenta en Nordhaus (2019):

$$\max_{c(t)} W = \max_{c(t)} \int_0^{\infty} U(c(t))e^{-\rho t} dt$$

sujeto a

$$c(t) = M(y(t); z(t); \alpha; \varepsilon(t))$$

donde $c(t)$ es el consumo; $z(t)$ son variables exógenas como la contaminación; $y(t)$ son otras variables endógenas (como la temperatura global); α son parámetros como la sensibilidad climática; ρ es la preferencia de tiempo pura; y $\varepsilon(t)$ son variables aleatorias. Nordhaus admite que la parte más difícil de la construcción del DICE es determinar las restricciones estructurales y menciona que en su versión actual (DICE2016-R2) el modelo incluye alrededor de 20 ecuaciones necesarias para representar la complejidad de las interacciones entre crecimiento económico y emisiones de CO₂, cambio climático e impactos económicos y políticas de reducción de emisiones.

Los modelos MEI también han acumulado una serie de críticas, y una de las más severas puede encontrarse en Pindyck (2013), quien sostiene que los modelos MEI tienen poco o ningún valor para evaluar políticas alternativas de cambio climático y estimar el CSC.

No obstante, tanto el desarrollo y estudio del modelo mismo, como los resultados obtenidos en las aplicaciones de modelos MEI, es tan extenso y goza de tal popularidad que cuenta con su propia revista especializada (*The Integrated Assessment Journal*), además de que se han construido múltiples variaciones al modelo básico que buscan examinar aspectos específicos del problema de evaluar el CSC, como el Modelo Regional de Economía Climática Integrada (RICE).

Van den Bergh y Botzen (2015) señalan que los tres modelos MEI más utilizados son el ya presentado DICE, modelos de Marco climático de Incertidumbre, Negociación y Distribución

³ Véanse también los siguientes trabajos relacionados: Rodríguez-Benavides *et al.* (2012), González-Aréchiga *et al.* (2001) y Venegas-Martínez (2000) y (2008).

(FUND), y modelos de Análisis de Políticas para el Efecto Invernadero (PAGE). Los modelos DICE, FUND y PAGE pueden considerarse modelos convenientes de forma reducida que simplifican la compleja interacción entre el clima y la economía, y son tratados efectivamente como “cajas negras” (van den Bergh y Botzen, 2015, p. 34).

En este contexto, Pizer et al. (2014) describen los pasos que involucra el cálculo del CSC: i) proyectar la dirección futura de las emisiones de GEI; ii) interpretar las proyecciones de emisiones, a la par de escenarios alternativos del cambio climático; iii) estimar los impactos físicos en humanos y ecosistemas de los cambios en el clima; y, iv) monetizar los impactos y descontar los daños futuros hacia el año de partida del modelo. Los modelos DICE, FUND y PAGE —mencionan— cumplen con los pasos indicados.

Es un consenso científico que la tendencia de calentamiento climático observada durante el siglo pasado se debe —principalmente— a actividades humanas (Anderegg et al., 2010; Cook et al., 2013, 2016; Doran y Zimmerman, 2009; Oreskes, 2004). Dentro de estas actividades, las que más contribuyen al crecimiento de las emisiones de GEI incluyen la producción económica, el aumento del consumo de energía, el aumento de la industrialización, la quema de combustibles fósiles, el ganado, el uso de fertilizantes, entre otros factores que aumentan la temperatura atmosférica por encima del promedio normal; lo cual plantea una amenaza para el medio ambiente (Kweku et al., 2018).

En efecto, el Grupo de trabajo III (GT3) del IPCC confirma que, a nivel mundial, el crecimiento económico y demográfico son los impulsores más importantes del aumento en las emisiones de CO₂ derivadas de la quema de combustibles fósiles. Sin embargo, es importante notar que, mientras las emisiones derivadas del crecimiento de la población entre 2000 y 2010 se mantuvo aproximadamente idéntica a la de las tres décadas anteriores a este periodo, la contribución del crecimiento económico a las emisiones de CO₂ aumentó considerablemente (IPCC, 2014).

En un contexto global, el IPCC agrupa las actividades económicas a las que se atribuye la mayor parte de las emisiones de GEI en cinco sectores generales para su estudio, a saber, sistemas de energía; transporte; edificios; industria; y, agricultura, silvicultura y otros usos del suelo (AFOLU) (ver IPCC, 2014). En conjunto, estos sectores comprenden aspectos de suministro de energía (sistemas de energía), demanda de energía (industria, edificios y transporte), emisiones de procesos no relacionados con la energía (industria) y emisiones y absorciones terrestres (AFOLU).

Lamb et al. (2021) puntualizan que las emisiones de GEI derivadas de sistemas de energía están dominadas por la generación de electricidad a base de carbón, a menudo a partir de un número limitado de unidades altamente contaminantes que son de larga duración y políticamente difíciles de retirar (Jakob et al., 2020). A su vez, las emisiones del transporte y los edificios son más difusas y se extienden entre muchos actores, pues tales emisiones están

vinculadas a la *forma urbana*⁴, infraestructura y hábitos de consumo de energía, lo que implica desafíos tecnológicos y sociales complejos para su mitigación (Creutzig et al., 2015). Por su parte, las emisiones de la industria están asociadas a la producción de metales, químicos, cemento y otros materiales de consumo doméstico. Gran parte de estos procesos productivos son ineficientes y ofrecen un amplio margen para recortes inmediatos en las emisiones, aunque algunos son difíciles de mitigar por completo (Rissman et al., 2020).

Para observar los factores económicos que históricamente se han asociado con cambios en los niveles de emisiones de GEI, usualmente se utiliza un análisis de descomposición de las emisiones totales en componentes como el PIB per cápita, crecimiento de la población per cápita, la intensidad de energía requerida por unidad de producto (energía/PIB) y la intensidad de las emisiones de GEI de la energía (GEI/energía).

En línea con esto, al considerar cantidades de GEI emitidos, evitando entrar en la digresión de unidades de medida, es tautológicamente cierto que

$$GEI = GEI$$

Así, al multiplicar y dividir el lado derecho de esta igualdad por mismas cantidades, es decir, al multiplicar por la unidad, la expresión se mantiene. Entonces, podemos operar montos de población (P), PIB y consumo de energía (E) como sigue:

$$GEI = GEI \cdot \frac{P}{P} \cdot \frac{PIB}{PIB} \cdot \frac{E}{E}$$

Luego, reordenando términos convenientemente obtenemos la descomposición de las emisiones:

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

donde P es el factor poblacional; GEI/E es la intensidad de las emisiones de GEI, que también es conocida como la huella de carbono energética; E/PIB es la intensidad de energía requerida por unidad de producto (rendimiento energético del sistema productivo); y, PIB/P es el PIB per cápita.

La igualdad (2) es conocida como la identidad de Kaya (ver Kaya y Yokobori, 1997), la cual —como mencionamos— establece que las emisiones de GEI pueden expresarse como el producto de cuatro factores: población, PIB per cápita, intensidad energética (por unidad de PIB) e intensidad de las emisiones (emisiones por unidad de energía consumida).

Al observar esta descomposición, Deutch (2017) describe que la intensidad energética disminuye, por ejemplo, cuando precios altos de la energía llevan a que las empresas realicen

⁴ La forma urbana se puede definir como el patrón espacial de las actividades humanas y su manifestación concreta en el medio construido de las ciudades (González Arellano y Larralde Corona, 2018).

inversiones en eficiencia energética para reducir la cantidad de energía necesaria para su producción. Similarmente, la intensidad de las emisiones disminuye, por ejemplo, cuando las empresas de servicios públicos sustituyen carbón por gas natural para la generación de energía, ya que el carbón emite casi el doble de CO₂.

Aunque el análisis de descomposición de Kaya originalmente se desarrolló para medir emisiones de CO₂ (Chica Moreu, 2016) podemos utilizarlo para medir los componentes de las emisiones de GEI. Actualmente, la identidad de Kaya es empleada por múltiples organizaciones e investigadores, por ejemplo, por el Global Carbon Project para descomponer las emisiones globales de CO₂ que son presentadas en el reporte “Global Carbon Budget” publicado anualmente desde 2007 (ver Friedlingstein et al., 2021). También debemos señalar que la identidad de Kaya es un caso de la —más general— identidad IPAT:

$$I = P \times A \times T \quad (3)$$

donde I es el impacto ambiental, P la población, A la afluencia y T la tecnología. Esta ecuación ha sido empleada durante décadas como un medio para examinar el cambio subyacente entre ambientalistas hacia una visión más aceptable del papel que la tecnología puede desempeñar en el desarrollo sostenible. Chertow (2000) subraya que, aunque la ecuación IPAT se utilizó inicialmente para determinar qué variable individual es la más dañina para el medio ambiente, una visión de la ecología industrial ha invertido este uso, siendo reconocido que los aumentos en la población y la riqueza pueden, en muchos casos, equilibrarse con las mejoras al medio ambiente ofrecidas por sistemas tecnológicos.

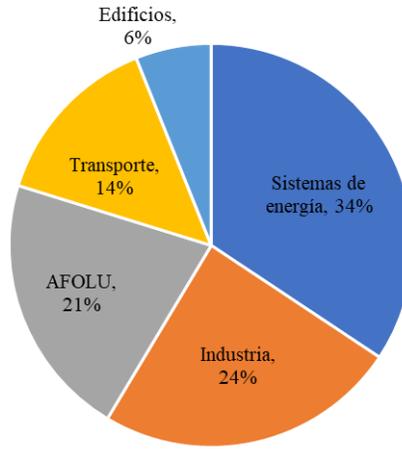
A pesar de que, en valores nominales, las identidades de Kaya e IPAT sugieren que las emisiones (de CO₂ o GEI) crecen de forma lineal a la par de la población, esta relación depende de los valores reales (o modelados) de la interacción entre la variable demográfica y el crecimiento económico, así como en aquella de la tecnología, la estructura económica y la afluencia (IPCC, 2000).

En este contexto, al llevar a cabo una revisión profunda de las tendencias y los factores que impulsan las emisiones de GEI en el periodo de 1990 a 2018, Lamb et al. (2021) utilizaron la identidad de Kaya para descomponer las emisiones de GEI a nivel de cada sector económico, modelando la tasa de crecimiento (r) de la tendencia de las emisiones en periodos mayores a un año como sigue:

$$r = \left(\frac{E_{FF}(t+n)}{E_{FF}(t)} \right)^{\frac{1}{n}} - 1$$

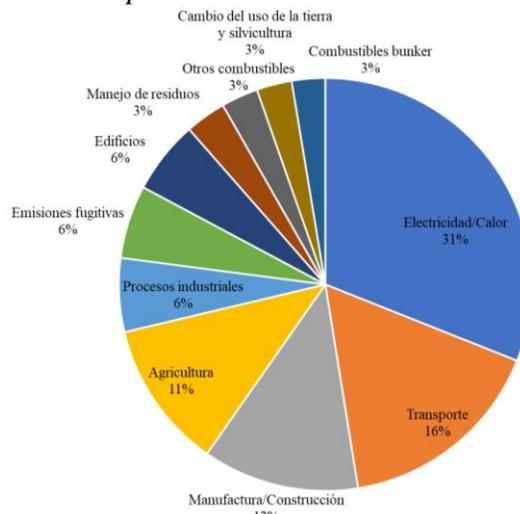
donde E_{FF} es el valor de las emisiones o el factor Kaya para el periodo t . Asimismo, Lamb et al. (2021) utilizando datos de la Base de Datos de Emisiones para la Investigación Atmosférica Global (EDGAR) encontraron que las emisiones de GEI en 2018 —año en que las emisiones globales de CO₂ alcanzaron su máximo histórico (ver Tollefson, 2018)— provinieron de los sectores económicos en las proporciones mostradas en la Figura 2.

Figura 2. Emisiones globales de GEI por sectores económicos en 2018 (EDGAR)



Fuente: Elaboración propia con (Lamb et al., 2021).

Figura 3. Emisiones globales de GEI por sectores económicos en 2018 (CAIT)



Fuente: Elaboración propia con datos de la CAIT del WRI.

La clasificación de sectores diseñada por el IPCC (sistemas de energía; transporte; edificios; industria; y, AFOLUE) será utilizada para fines comparativos, especialmente una vez que se cuente con la contribución del GT3 al sexto informe de evaluación (AR6) del IPCC próximo de ser publicado⁵. No obstante, para fines de esta investigación, debido a la disponibilidad de datos para el modelo a evaluar en la sección 4, consideraremos las emisiones

⁵ El reporte está calendarizado a ser emitido en marzo de 2022, mientras que el último disponible se publicó en 2014.

de GEI como se agrupan en los datos provistos por la Herramienta de Indicadores de Análisis Climático (CAIT) del World Resources Institute (WRI), a saber:

- Agricultura
- Cambio del uso de la tierra y silvicultura
- Combustibles bunker
- Energía
 - Edificios
 - Electricidad/Calor
 - Emisiones fugitivas
 - Manufactura/Construcción
 - Otros combustibles
 - Transporte
- Manejo de residuos
- Procesos industriales

Tomando estos sectores en consideración, a nivel global, la contribución sectorial a las emisiones de GEI se ilustra en la Figura 3.

Es importante resaltar que la clasificación de sectores económicos que utiliza el IPCC, EDGAR y la sectorización que brinda el CAIT son, en general, compatibles, pues el CAIT agrega datos los principales sectores del IPCC, incluidos los subsectores de energía como se enlistan arriba (ver World Resources Institute, 2015). No obstante, la metodología utilizada por distintas bases de datos puede —y suele— variar, por lo que debemos realizar puntualizaciones importantes antes del procesamiento de los datos; las metodologías serán analizadas a detalle en la sección 4.

Al observar una primera instancia de la distribución de emisiones de GEI por actividades económicas, claramente los sistemas de energía contribuyen mayoritariamente, seguidos de la industria y muy de cerca encontramos al sector AFOU. También podemos notar que las emisiones del transporte y los edificios son las de menor contribución y, al mismo tiempo, podemos comentar que estos sectores representan retos importantes para su evaluación al depender de múltiples agentes.

En sincronía con lo referido al surgimiento de los estudios de la CAK, el modelaje de los sistemas de energía se popularizó en los años 70, en parte, debido a la primera crisis petrolera y a la formación de grupos como El Club de Roma que pretendían aumentar la consciencia ambiental e impulsar el desarrollo sostenible (ver Colombo, 2001).

En este contexto, (Urban et al., 2007) reflexionan en el hecho de que la mayoría de los modelos energéticos se construyeron y utilizaron en países industrializados, por lo que los modelos desarrollados para países en desarrollo se basaron principalmente en supuestos compatibles con la experiencia de los sistemas energéticos en países desarrollados, es decir, al menos en sus inicios, no se realizaron los ajustes en los modelos para empatar la realidad de países en desarrollo.

Podemos agregar que es a partir de estas diferencias fundamentales que las emisiones de GEI deberían ser entendidas y analizadas; es preciso un entendimiento de las condiciones económicas de cada país o región, como el tipo de actividades predominantes (agrícola, industrial o servicios), así como de la estructura de costos que depende de cada sistema energético, por ejemplo, en México el gobierno es un actor importante en el sector energético, mientras que en países desarrollados la inversión puede encontrarse mayoritariamente aportada por agentes privados. Otros factores importantes para considerar son la población y el contexto demográfico, la dependencia de la balanza de pagos en energéticos, la tecnología disponible, las reservas de cada tipo de energético, donde esto último depende no solo de las condiciones económicas sino naturales en cada región.

En línea con las puntualizaciones anteriores, uno de los primeros estudios que busca medir las emisiones de GEI de diferentes sectores económicos en México fue el desarrollado por Kochi y Medina López (2013), quienes estimaron los niveles de emisión de SO₂ de diversas fuentes de contaminación, en concreto, de la industria, pequeñas empresas y emisiones de automóviles.

En años más recientes, Pérez Pérez y Nieto Barajas (2019) analizaron, mediante un modelo jerárquico, las emisiones de GEI de los principales sectores industriales de México con lo que obtuvieron estimadores de eficiencia económico-ambiental para cada sector. Una contribución importante de este trabajo es el mapeo conceptual entre la clasificación ambiental del IPCC y el Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN), el cual apertura la oportunidad para medir las emisiones de GEI a nivel sectorial a la vez que se analiza la estructura económica y la aportación al producto de cada sector. Sin embargo, este mapeo no es completo debido a la incompatibilidad formal de los sistemas y a áreas de oportunidad en la gestión de información de ciertos sectores en México.

La energía es fundamental para la producción económica; y en la proporción en que esta energía provenga de combustibles fósiles, su consumo inevitablemente genera emisiones de CO₂, en adición a otras emisiones de GEI que son resultado de la actividad en distintos sectores económicos como lo hemos expuesto arriba. En este contexto, a medida en que en los países se promueve la transición hacia una economía respetuosa del medio ambiente, existe un debate sobre si el crecimiento puede impulsar, o incluso coexistir con, la estabilización climática.

En la discusión sobre el cambio climático con frecuencia se presenta el malentendido de que la descarbonización de la economía es incompatible con el crecimiento económico. Una posición que plantea el argumento de que reducir las emisiones de GEI requiere de una disminución organizada de la producción económica es la denominada alternativa del “decrecimiento” (ver Stuart et al., 2020). En el otro extremo se sostiene que la política medioambiental no debe ser una prioridad si es que su implementación impacta negativamente la producción, por ejemplo, cuando se interpreta de forma equívoca el modelo de la CAK en el diseño de políticas del tipo “cree ahora, limpia después” (Pérez-Cirera et al., 2018, p. 761).

Generalmente, las estrategias hacia objetivos climáticos ambiciosos se basan en el concepto de “desacoplamiento”; es decir, apuntan a promover el crecimiento económico mientras

se reduce el uso de recursos naturales y las emisiones de GEI (Haberl et al., 2020). En este sentido, fue la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) la primera organización internacional en adoptar el concepto de desacoplamiento (Fischer-Kowalski et al., 2011), el cual concretamente define como el rompimiento del vínculo entre los “males ambientales” y los “bienes económicos” (OCDE, 2002); en su forma más simple, el desacoplamiento para un periodo t se mide a partir de un cociente:

$$\text{Cociente de desacoplamiento} = \frac{(PA/FIE)_t}{(PA/FIE)_{t-1}}$$

donde PA es la presión ambiental (p.ej. emisiones de GEI) y FIE es la fuerza económica impulsora (p.ej. PIB o población). Si el cociente de desacoplamiento es menor a 1, entonces hay desacoplamiento en el periodo. La OCDE también define el factor de desacoplamiento como:

$$\text{Factor de desacoplamiento} = 1 - \text{cociente de desacoplamiento}$$

Cuando el factor es cero o negativo en la ausencia de desacoplamiento, y tiene un valor máximo de 1 cuando la presión ambiental se aproxima a cero. Notemos que el factor de desacoplamiento generalmente no cambiará linealmente, incluso si lo hacen tanto la presión ambiental como la fuerza impulsora. Debemos recalcar también que el desacoplamiento puede ser relativo, esto es, cuando la tasa de crecimiento económico es mayor que la tasa de crecimiento de las emisiones, o absoluto, cuando las emisiones caen en términos absolutos incluso cuando la economía continúa creciendo.

Una herramienta ilustrativa para analizar el desacoplamiento es la identidad de Kaya, por ejemplo, Deutch (2017) ofrece un análisis aplicando la identidad en su forma diferencial:

$$\frac{\partial C}{C} = \frac{\partial(E/Y)}{(E/Y)} + \frac{\partial(C/Y)}{(C/Y)} + \frac{\partial Y}{Y}$$

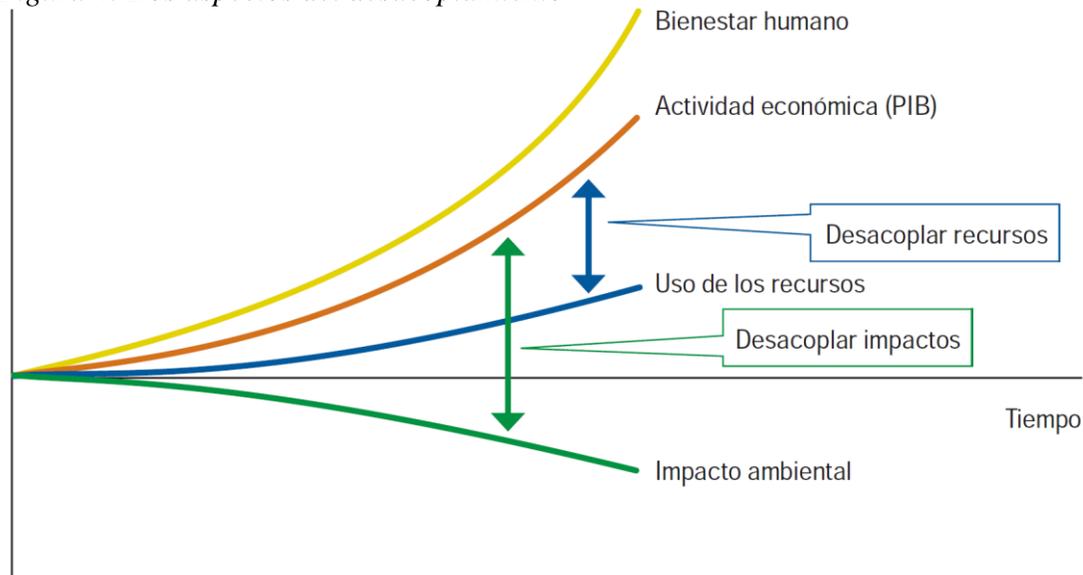
donde Y es el PIB, C emisiones de CO₂, E energía, (E/Y) es la intensidad de la energía y (C/Y) la intensidad del CO₂. Deutch también encuentra que el grado de desacoplamiento entre el crecimiento económico y las emisiones de CO₂ depende enteramente de las reducciones en la intensidad de energía y carbono.

Jackson y Victor (2019) argumentan que un mejoramiento en la intensidad de las emisiones no siempre corresponde con una disminución en las emisiones mismas, por lo que se debería observar el desacoplamiento absoluto. Para que el desacoplamiento relativo induzca un desacoplamiento absoluto, la intensidad de las emisiones debe disminuir al menos tan rápido como se incrementa el producto. Si la tasa de disminución de la intensidad de las emisiones es mayor que la tasa de crecimiento económico, entonces el nivel de emisiones disminuirá.

De la misma manera, es importante distinguir el desacoplamiento de recursos y el desacoplamiento de impacto (ver Fischer-Kowalski et al., 2011). Por un lado, el desacoplamiento de recursos implica la reducción de la tasa de uso de recursos (primarios) por unidad de actividad económica (p. ej., disociación del PIB del uso de energía o materiales), lo que significa un

incremento en la eficiencia del uso de los recursos. En contraste, el desacoplamiento de impacto se presenta como el incremento en el producto mientras se reduce el impacto ambiental, es decir, el impacto negativo al ambiente es reducido mientras se añade valor económico (por ejemplo, la disociación del PIB de las emisiones de GEI). En la Figura 4 se ilustra esta distinción.

Figura 4. Dos aspectos del desacoplamiento



Fuente: Fischer-Kowalski et al. (2011, p. 5).

Existen distintos análisis para calcular el desacoplamiento entre emisiones de GEI y crecimiento económico que difieren en naturaleza metodológica. Wu et al. (2018) realizaron una revisión de los principales métodos disponibles para la obtención de índices de desacoplamiento, y compararon las ventajas y desventajas de cada metodología (ver Tabla 2); estos incluyen — pero no están limitados a— el factor de desacoplamiento de la OCDE expuesto anteriormente, así como el método de análisis de variación, el cual de manera exhaustiva considera las variaciones de la presión ambiental, crecimiento económico y presiones ambientales por unidad del PIB, y determina los tipos de desacoplamiento mediante el análisis de estas variaciones.

Del mismo modo, un método que elabora a partir de los mencionados arriba, es el análisis elástico de Tapio (2005), el cual subdivide los estados de desacoplamiento y no desacoplamiento en ocho grados de acuerdo con valores elásticos para evaluar con mayor profundidad el desacoplamiento de las variables investigadas. Utilizando este método, Yang et al. (2021) investigaron el estado de desacoplamiento de 78 países, entre ellos México, cuyo resultado es que se encontró en la etapa de desacoplamiento negativo expansivo en el periodo 2000-2011 y en la etapa de desacoplamiento débil entre 2011-2017.

Tabla 2. Métodos utilizados comúnmente para medir el desacoplamiento

Método	Ventajas	Desventajas	Literatura
Factor de desacoplamiento de la OCDE	Requiere menos datos, fácil de entender	No se puede distinguir entre desacoplamiento absoluto y desacoplamiento relativo,	de Freitas y Kaneko (2011), Organisation for Economic Co-operation and

		y ningún desacoplamiento puede dividirse aún más	Development (2002), Yu et al. (2013), Zhao et al. (2017)
Análisis de variación	Requiere menos datos, fácil de entender	No permite distinguir entre desvinculación y volver vincular	Vehmas et al. (2007)
Análisis elástico de Tapio	Descentralización más refinada del estado (de desacoplamiento), menos datos requeridos, fácil de entender	Demasiados tipos de divisiones pueden causar confusión de conceptos y tipos	Climent y Pardo (2007), Luo et al. (2017), Naqvi & Zwickl (2017), Ren y Hu (2012), Tapio (2005), Wang et al. (2017)
Modelo de desacoplamiento IGTX	Se puede aplicar fácilmente al cálculo de indicadores relacionados	De menor uso, necesidad de distinguir entre crecimiento o contracción económica en el caso de desacoplamiento	Ma et al. (2016)
Análisis econométrico	Métodos más sofisticados, formas diversas	Requiere mayor calidad de los datos, la selección de variables es más subjetiva	Enevoldsen et al. (2007), Mielnik y Goldemberg (2002), Nanthakumar y Subramaniam (2010)

Fuente: Elaboración propia con (Wu et al., 2018).

De la misma manera, Wu et al. (2018) explican que debido a que los modelos basados la identidad IPAT (expuesta con anterioridad), como el de Lu y Mao (2003, citado en Wu et al., 2018) no permiten distinguir entre desacoplamiento absoluto y relativo, Lu et al. (2011, como se citó en Wu et al., 2018) se dieron a la tarea de mejorar esta práctica y desarrollaron el modelo IGTX, para ampliar las observaciones en tipos de desacoplamiento.

Por supuesto, analizar el desacoplamiento mediante modelaje econométrico es bastante usual y la literatura es basta (ver Csereklyei y Stern, 2015; García-Gusano et al., 2018; Mikayilov et al., 2018); para este método se deben abordar consideraciones importantes para su diseño y construcción, análogo a lo descrito en la discusión de la literatura disponible para la CAK.

El interés en observar detalladamente la desvinculación entre emisiones de GEI y crecimiento económico nos permite identificar fenómenos como el descrito por la Agencia Internacional de la Energía (IEA, por sus siglas en inglés) cuando reveló que en 2014, por primera vez en más de 40 años que se han registrado estos parámetros, el PIB global creció mientras que las emisiones de carbono se estabilizaron (IEA, 2016). En línea con este resultado, Yang et al. (2021) detectaron que desde 2009 el ritmo de crecimiento económico global fue más rápido que el de las emisiones globales de carbono. Este fue el inicio de una tendencia emergente que se replica en al menos 21 países, los cuales han logrado reducir sus emisiones de GEI a la par de un crecimiento del PIB (Aden, 2016). Debemos mencionar, sin embargo, que en 2020, a raíz de la crisis sanitaria y económica, las emisiones de CO₂ se redujeron en 5.4%

(Friedlingstein et al., 2021) a la par de una caída de 3.5% en el PIB global (World Bank, 2021); no obstante, este resultado se ha observado en otros periodos de debilidad económica mundial, como a principios de los años ochenta, y en los años 1992 y 2009, cuando las emisiones se detuvieron o disminuyeron en comparación con el año anterior.

4. Incentivos económicos sobre la reducción de emisiones contaminantes

Esta sección está dedicada a examinar los incentivos económicos que tiene México sobre la reducción de emisiones de GEI, con base en la estructura del mercado interno. Para ello, se parte de la reseña general de los acuerdos internacionales a los que el país se ha comprometido en materia ambiental, y en específico, a la reducción de emisiones de GEI. Asimismo, realizamos una revisión general de la legislación en materia ambiental y energética que México ha implementado para cumplir con sus obligaciones de reducción de emisiones. También se puntualiza la estructura del sector energético del país.

A mediados de los años setenta, el mexicano Mario Molina contribuyó a predecir que las emisiones de clorofluorocarbonos (CFC) podrían agotar el ozono estratosférico; en 1995 recibió, junto con los científicos F. Sherwood Rowland y Paul J. Crutzen, el premio nobel de química “por su trabajo en química atmosférica, particularmente en relación con la formación y descomposición del ozono” (*The Nobel Prize in Chemistry 1995*, 2022). Fue a partir de los resultados de dicho trabajo y con algo de diplomacia que Molina ayudó a que se conformara el Protocolo de Montreal de 1987, un tratado internacional diseñado para proteger la capa de ozono mediante la eliminación gradual de la producción de numerosas sustancias que son responsables del agotamiento del ozono (McNeill, 2020).

El Protocolo de Montreal ha cumplido su objetivo original al poner la capa de ozono estratosférico en el camino de la recuperación; entre otros logros, podemos mencionar que ha sido muy eficaz para proteger la capa de ozono estratosférico y evitar aumentos globales de la radiación solar ultravioleta B en la superficie de la Tierra (McKenzie et al., 2019), además de haber sido el primer tratado ratificado por todas las naciones (Molina & Zaelke, 2017), incluido México, que en 1988, fue uno de los primeros países en firmarlo y ratificarlo (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2022).

El Protocolo de Montreal sentó las bases ante la preocupación mundial sobre el cambio climático, al obligar a los estados miembros a actuar en interés de la seguridad humana incluso bajo un contexto que implicaba incertidumbre científica, pues a principios de la década de los 90 había menos evidencia científica que ahora sobre el cambio climático (United Nations Framework Convention on Climate Change, 2022c).

Los principios del Protocolo de Montreal serían retomados por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), misma que fue adoptada en 1992 y que entró en vigor en 1994, cuyo objetivo es “la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático”; la CMNUCC en su Artículo 2 también establece que “ese nivel debería lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten

naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible." (Naciones Unidas, 1992).

A la fecha (mayo de 2022), los 197 países de la comunidad internacional han ratificado la CMNUCC (Naciones Unidas, 2022b), y debemos mencionar que la responsabilidad del cambio climático originalmente recaía en los países Anexo I, es decir, países industriales que son la fuente de la mayoría de las emisiones de GEI, de quienes se espera implementen en mayor medida las estrategias para reducir las emisiones en su territorio (United Nations Framework Convention on Climate Change, 2022c). Por su parte, la CMNUCC fue firmada por el gobierno de México el mismo año de su adopción, el cual firmó como un país no Anexo I, esto es, sin haber hecho compromisos cuantitativos de reducción de emisiones, aunque compartiendo compromisos aplicables a todas las partes de la convención tales como actividades de planeación, implementación de acciones y educación y difusión del conocimiento (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2015).

En 1997, durante la tercera Conferencia de las Partes (COP) —conformada por miembros de la CMNUCC, fue aprobado el Protocolo de Kyoto, el cual pone en funcionamiento la CMNUCC y a diferencia de esta, la cual se limita solicitar a los países adopción de políticas y medidas de mitigación e informes periódicos, el Protocolo de Kyoto compromete a los países industrializados a limitar y reducir las emisiones de GEI de conformidad con las metas individuales acordadas (United Nations Framework Convention on Climate Change, 2022b). Debemos señalar que solo las partes (países) de la CMNUCC que ratificaron el Protocolo de Kyoto fueron obligadas por los compromisos de este, además de que el mismo no introdujo ningún nuevo compromiso —adicional a los acordados en la CMNUCC, para las partes no incluidas en el Anexo I, como en el caso de México.

Con el Protocolo de Kyoto se reconoció que el efecto invernadero es un factor principal del calentamiento global, el cual podemos describir como el fenómeno que mantiene parte del calor del planeta que de otro modo escaparía de la atmósfera al espacio. Debemos puntualizar que los GEI son el aspecto más importante para estudiar el calentamiento global (Kweku et al., 2018).

En este contexto, dentro de las “responsabilidades comunes pero diferenciadas” (Naciones Unidas, 1998) asignadas a cada país en el Protocolo de Kyoto, se incluyeron un conjunto de medidas para reducir las emisiones de GEI, además de que se precisó cuáles GEI deberían ser observados para su abatimiento, los cuales fueron definidos en el Anexo A del protocolo, a saber:

- Dióxido de carbono (CO₂)
- Metano (CH₄)
- Óxido nitroso (N₂O), y,
- los llamados gases fluorados (F-gases), que incluyen hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarburos (PFC), y hexafluoruro de azufre (SF₆).

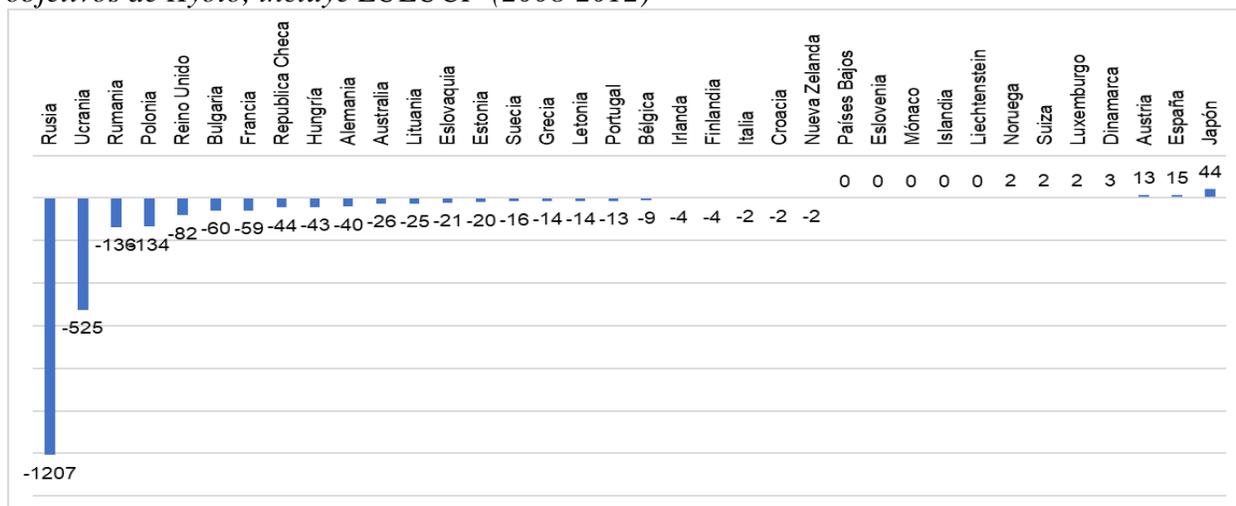
Las emisiones antropógenas de estos gases son expresadas en dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) para su medición (Naciones Unidas, 1998). Una emisión de CO₂eq es la

cantidad de emisión de CO₂ que ocasionaría, en un periodo dado, el mismo forzamiento radiativo⁶ que una cantidad emitida de un GEI o de una mezcla de GEI. Para un GEI, las emisiones de CO₂eq se obtienen multiplicando la cantidad de GEI emitida por su potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) para un periodo dado. Si se trata de una mezcla, se obtienen sumando las emisiones de CO₂eq de cada uno de los gases (Pachauri & IPCC, 2008), en concreto:

$$CO_{2eq} = masa\ de\ GEI \times GWP$$

Los compromisos cuantificados de limitación de emisiones de GEI considerados en el Protocolo de Kyoto para 38 países, determinados en su Anexo B, en conjunto implicarían una reducción de 5% respecto del nivel de emisiones que se presentaba en 1990, lo cual debía ser conseguido en el primer periodo de compromiso comprendido entre 2008 y 2012 (Naciones Unidas, 1998). No obstante, debemos mencionar que a partir de la no ratificación de Estados Unidos y la retirada de Canadá del Protocolo de Kyoto (ver Fjellvang, 2015; Harrison, 2007; Hovi et al., 2012; y “U.S. Rejection of Kyoto Protocol Process”, 2001, para un análisis detallado de estos eventos) el compromiso de los 36 países que participaron enteramente en el protocolo, equivalía a una reducción del 4% de sus emisiones (Shishlov et al., 2016).

Figura 5. Diferencia absoluta entre el promedio anual de emisiones de países Anexo B y sus objetivos de Kyoto, incluye LULUCF⁷(2008-2012)



Nota: Toneladas de dióxido de carbono equivalente (MtCO₂e).

Fuente: Elaboración con base en Shishlov et al., 2016.

Este objetivo se pactó a finales de los 90, y en efecto, durante el periodo 1990-2008, las emisiones agregadas de GEI excluyendo el Uso del suelo, Cambio de Uso del suelo, y Silvicultura (LULUCF, por sus siglas en inglés) de los países Anexo I disminuyeron en 6%,

⁶ El forzamiento radiativo es una medida de la variación neta del balance energético en la atmósfera, medido en vatios/metro.

⁷ Uso del suelo, Cambio de Uso del suelo, y Silvicultura.

mientras que incluyendo las actividades de LULUCF esto representó una disminución de 10.7% en el mismo periodo (United Nations Framework Convention on Climate Change, 2011). Por su parte, durante el periodo 1990-2012, estas emisiones se redujeron en 10.6% sin considerar las emisiones/remociones de LULUCF (United Nations Framework Convention on Climate Change, 2014). Del mismo modo, al considerar las emisiones de GEI de los 36 países que formaron parte del Protocolo de Kyoto hasta su conclusión, durante el periodo 2008-2012, se redujeron en 24% por debajo del año base considerado⁸ (Shishlov et al., 2016). Esto implica que, en términos agregados, el primer objetivo fue exitosamente efectuado, aunque se presentaron diferencias entre países, por ejemplo, Austria, España, Dinamarca, Islandia, Japón, Liechtenstein, Luxemburgo, Países Bajos y Suiza emitieron niveles de GEI mayores a los comprometidos (Figura 5).

Asimismo, es importante recalcar que el objetivo marcado para el primer periodo de compromiso nunca pretendió ser una solución definitiva al cambio climático; de hecho, el Protocolo de Kyoto estableció una estructura de periodos de compromiso subsecuentes, para los que sería necesario una serie de negociaciones para adecuar los objetivos de abatimiento de las emisiones de GEI (Grubb & Depledge, 2001). De este modo, en 2012, año en que finalizó el primer periodo de compromiso, durante la octava sesión de la COP, partes del Protocolo de Kyoto adoptaron la Enmienda de Doha, la cual, sin embargo, entró en vigor hasta el 31 de diciembre de 2020 (Naciones Unidas, 2022c).

La Enmienda de Doha presentó un segundo periodo de compromiso que comenzó en 2013 y finalizó en 2020; esta enmienda presentó un ajuste a los compromisos cuantificados de reducción de emisiones de GEI originales, estableciendo el objetivo de reducir las mismas en al menos 18% en comparación a los niveles de 1990 (Naciones Unidas, 2020). Asimismo, con la Enmienda de Doha se añadió al Trifluoruro de nitrógeno (NF₃) —que forma parte de los F-gases, a la lista de GEI contemplada en el Anexo A del Protocolo de Kyoto (Naciones Unidas, 2012).

En el marco del segundo periodo de compromiso, partes de la CMNUCC adoptaron el Acuerdo de París en el año 2015, el cual sirve como sucesor del Protocolo de Kyoto, diferenciándose de este último principalmente porque no solo impone compromisos de reducción de emisiones de GEI a los países desarrollados, si no que todas las partes adquieren responsabilidades para el abatimiento y cuentan con una flexibilidad considerable para definir la rigurosidad de los compromisos aceptados. Asimismo, el Acuerdo de París no impone obligaciones exigibles para alcanzar los objetivos que se hayan establecido, sino que se basa en una serie de obligaciones de información y esfuerzos colectivos de inventario. También creó obligaciones de adaptación, finanzas y desarrollo, así como la transferencia de tecnología y otras cuestiones (Horowitz, 2016). Hacia mayo de 2022, de las 197 partes de la CMNUCC, 193 son partes del Acuerdo de París (Naciones Unidas, 2022a), entre ellos México; de los cuatro estados que no han ratificado el acuerdo, el único gran emisor es Irán.

⁸ Algunas economías tenían asignado un periodo base distinto de 1990 (ver United Nations Framework Convention on Climate Change, 2008).

En su Artículo 2, el Acuerdo de París establece como objetivo "mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales" (Naciones Unidas, 2015), para alcanzar este objetivo, los países se proponen alcanzar el máximo de las emisiones de GEI lo antes posible, para luego reducir rápidamente dichas emisiones, y alcanzar un equilibrio climático a mediados del siglo (Artículo 4). Para determinar el avance colectivo en el cumplimiento de sus objetivos a largo plazo, la COP realizará un balance mundial cada cinco años, iniciando en 2023 (Artículo 14).

Como mencionamos arriba, el Acuerdo de París, en contraste con el Protocolo de Kyoto, no establece objetivos fijos para cada país, si no que cada uno de estos, en el contexto de su economía y sociedad, realiza planes de acción climática conocidos como contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC, por sus siglas en inglés), los cuales fueron presentados en 2020 (United Nations Framework Convention on Climate Change, 2022a). Por su parte, México fue el primer país en desarrollo que emitió sus contribuciones previstas determinadas a nivel nacional (INDC, por sus siglas en inglés), en el que incluyó planes con respecto a la adaptación y un objetivo para reducir el carbono (United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015).

A pesar de que el Acuerdo de París ha sido aclamado por participantes y los medios de comunicación como un importante punto de inflexión para la política en la lucha por remediar el daño al medio ambiente y regular el cambio climático, no ha sido así sin sus críticas. Por ejemplo, Spash (2016) argumenta que el Acuerdo, no supone recortes sustanciales en las emisiones de GEI en el corto plazo, además de que las intenciones de las partes permiten un escalamiento de daños e incluso trata los peores escenarios como una probabilidad aceptable del 50%. Esta crítica encuentra soporte en las cuantificaciones de las promesas de acción en la COP en 2021, las cuales sugirieron una probabilidad de menos del 50 por ciento de mantener el calentamiento por debajo de los 2 grados centígrados (Meinshausen et al., 2022).

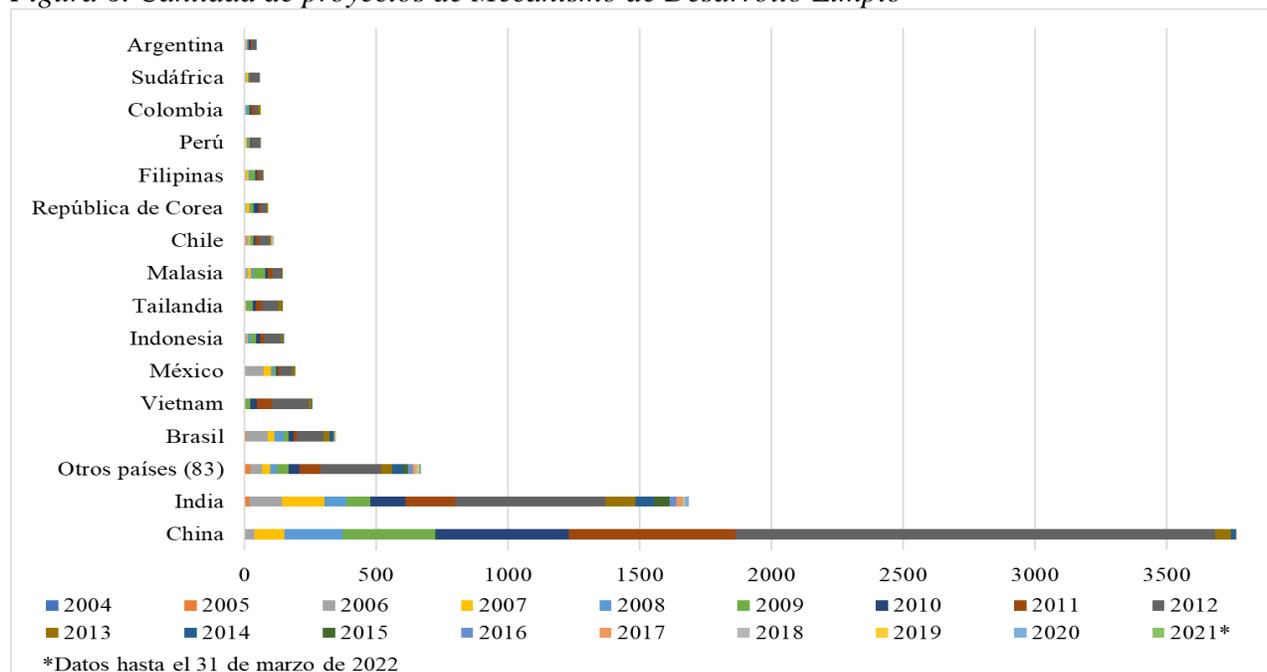
Al respecto de si el Protocolo de Kyoto, o el más reciente Acuerdo de París tendrá éxito en mantener los niveles de la temperatura del planeta en condiciones óptimas hay mucho que podría especularse; usualmente la conclusión es mixta. Hay muchas razones para dudar de que el acuerdo de París logre avanzar en su objetivo (Young, 2016). Sin embargo, hay más espacio para la esperanza puesto que representa un esfuerzo internacional de gran escala con mucho potencial.

México no adquirió compromisos cuantificados de reducción de emisiones de GEI (al ser un país no Anexo I) dentro del marco del Protocolo de Kyoto, sin embargo, las primeras disposiciones para abordar directamente el cambio climático dentro de este marco se introdujeron en la Ley General de Vida Silvestre (decretada en julio de 2000) y la Ley de Aguas Nacionales (reformada en 2004) para incentivar la generación de servicios ambientales, incluida la captura de carbono; asimismo el país está obligado a elaborar inventarios nacionales de emisiones, comunicados, así como estudios de mitigación y adaptación al cambio climático (García Hernández & Lucatello, 2022). De la misma manera, el país ha contribuido dentro de las estrategias contempladas por el Protocolo de Kyoto mediante los mecanismos de mercado flexibles basados en el comercio de permisos de emisión y bajo el principio de que no importa donde se reduzcan las emisiones de GEI, lo importante es que se eliminen de la atmósfera (United Nations Framework Convention on Climate Change, s/f). Estos mecanismos incluyen el

comercio internacional de emisiones (con fundamento en el artículo 17), el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) (artículo 12), y la aplicación conjunta (artículo 6).

En este contexto, debemos destacar la participación que ha tenido México mediante el MDL, pues el país ocupa el quinto lugar por número de proyectos MDL registrados (192 en el periodo 2004-2022) de un total de 98 países que han contribuido con en este mecanismo a la reducción de emisiones de GEI (figura 6). Con estos proyectos, México ha emitido más de 35 millones de Certificados de Reducción de Emisiones (CER) (figura 7). Asimismo, en la tabla 3 se presenta un resumen de los proyectos registrados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) clasificados por categoría.

Figura 6. Cantidad de proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio

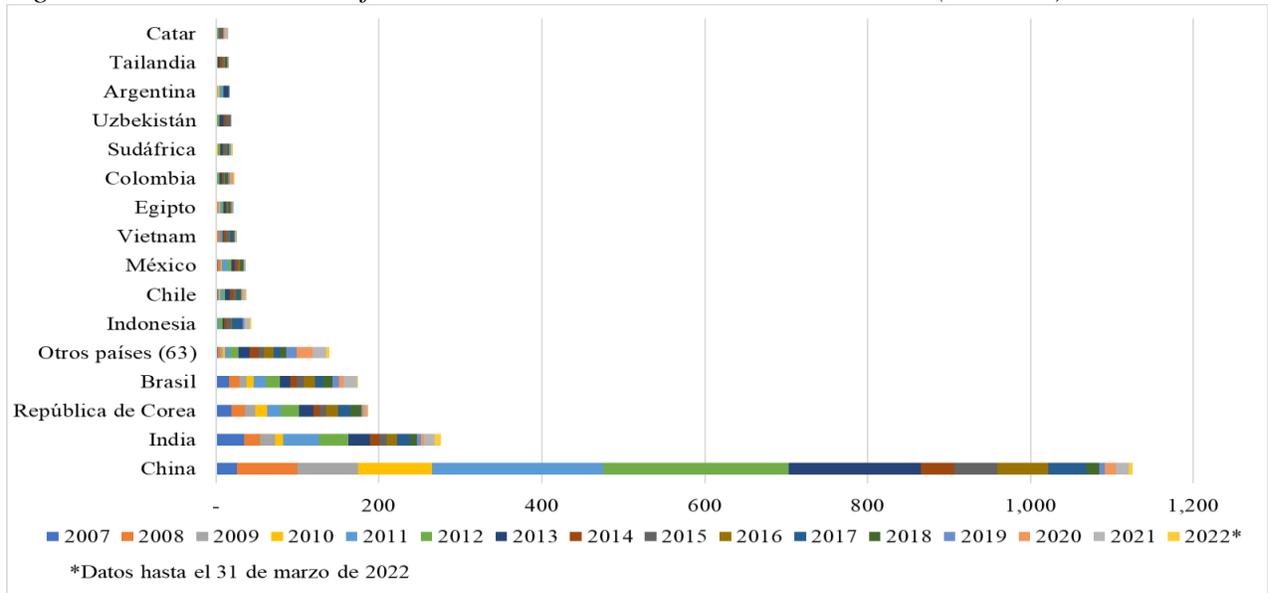


Fuente: Elaboración con datos de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (2022).

Los proyectos del MDL tienen su fundamento en el artículo 12 del Protocolo de Kyoto; este procedimiento permite que países desarrollados financien proyectos de mitigación de emisiones de GEI dentro de países en desarrollo, a cambio de recibir CER (cada certificado equivale a una tonelada de CO₂) que pueden utilizar para cubrir sus compromisos ante el Protocolo, o bien, venderlos en el mercado abierto (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2018). Al respecto, Montaud y Pecastaing (2016) realizaron una evaluación del impacto de las inversiones en proyectos MDL en la economía mexicana mediante un modelo de equilibrio general computable (CGE, por sus siglas en inglés); concluyeron que las inversiones del MDL contribuirían positivamente al crecimiento económico, pero también tendrían impactos ambientales negativos; añaden que el impacto ambiental general del MDL en México depende de la naturaleza de los sectores a los que afecta y de la intensidad de los impactos que generaría. A nivel sectorial, las inversiones actuales del MDL no reducen significativamente los costos de degradación y agotamiento de los recursos naturales en México, donde los efectos ambientales

negativos provienen principalmente de los sectores de minería, agricultura y servicios, mientras que estos sectores generalmente atraen pocas inversiones.

Figura 7. Cantidad de Certificados de Reducción de Emisiones emitidos (millones)



Fuente: Elaboración con datos de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (2022).

Tabla 3. Proyectos MDL registrados y Reducciones Certificadas de Emisiones en México

Tipo de proyecto	Categoría	Subcategoría	Proyectos registrados			Proyectos registrados con Reducciones Certificadas de Emisiones (RCE)		
			Número de proyectos	Año de registro	Promedio anual de RCE esperadas	Número de proyectos	Periodo	RCE obtenidas acumuladas
					(t CO ₂ e / año)			(t CO ₂ e)
Proyecto	Agricultura, Bosques y otros Usos de suelo	Reforestación – Forestación	0	-	0	0	-	0
	Desechos	Manejo de Residuos en Establos de Ganado Vacun	17	2006-2009	160,441	5	2006 - 2011	36,466
		Manejo de Residuos en Granjas Porcícolas	80	2005-2008, 2011-2013	2,669,393	35	2005 - 2012	2,913,226
		Relleno Sanitario	29	2006-2013, 2015	3,127,363	11	2006 - 2018	4,690,072
		Tratamiento de Aguas Residuales	1	2009	15,153	0	-	0
	Generación de energía	Eólica	29	2005, 2007-2009, 2011-2013	8,602,468	11	2007 - 2018	9,630,411
		Geotérmica	1	2012	86,495	0	-	0
		Hidroeléctrica	8	2006, 2007, 2012, 2013	313,366	3	2003 - 2011	629,668
		Mareomotriz	0	-	0	0	-	0
		Solar	0	-	0	0	-	0
	Procesos industriales	Emisiones de Gases Industriales	3	2006, 2009, 2013	2,580,561	2	2006 - 2018	15,051,725
	Reinyección de Gas	Reinyección de Gas Amargo en Pozos Petroleros	0	-	0	0	-	0

	Amargo en							
	Uso de la energía	Cogeneración	2	2013, 2015	146,361	0	-	0
		Distribución de electricidad	0	-	0	0	-	0
		Eficiencia Energética	7	2006, 2008, 2009, 2011, 2012	389,412	1	2008 - 2014	710,826
		Emisiones Fugitivas de Metano	2	2010, 2013	377,813	1	2013 - 2014	85,177
		Sustitución de Combustibles	9	2010 - 2013	511,425	0	-	0
		Transporte	5	2011, 2012	518,356	3	2011 - 2014	102,111
Programa de Actividades	Desechos	Manejo de Residuos en Establos de Ganado Vacun	0	-	0	0	-	0
		Manejo de Residuos en Granjas Porcícolas	2	2012, 2013	3,795	0	-	0
		Tratamiento de Aguas Residuales	1	2013	5243	0	-	0
		Relleno Sanitario	0	-	0	0	-	0
	Generación de energía	Hidroeléctrica	1	2012	4,811	0	-	0
		Solar	1	2012	18,417	0	-	0
	Uso de la energía	Cogeneración	0	-	0	0	-	0
		Eficiencia Energética	5	2009, 2012, 2013	64,812	2	2009 - 2013	38,291
Total			203		19,595,685	74		33,887,973

Nota: Datos al 31 de diciembre de 2019.

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2020).

Por otra parte, los INDC que México presentó como parte de su compromiso con el Acuerdo de París, comprenden fines de mitigación tanto para la reducción de GEI como para contaminantes climáticos de vida corta (SLCP, por sus siglas en inglés). Las acciones para abatir los SLCP contribuyen simultáneamente a la mitigación del cambio climático en el corto plazo y al mejoramiento inmediato de la calidad del aire; estos objetivos son consistentes con las recomendaciones contenidas en el 5° Informe de Evaluación del IPCC, así como con los lineamientos de la Coalición Clima y Aire Limpio (CCAC) de la cual México es miembro (Gobierno de la República, 2016).

Del mismo modo, los NDC presentados por México en su actualización 2020, incluyen dos componentes: uno de mitigación y uno de adaptación. El primero considera compromisos no condicionados, que serán implementados con recursos propios del país, y compromisos condicionados, que requieren del apoyo de instrumentos financieros, técnicos, tecnológicos y de fortalecimiento de capacidades. Los compromisos no condicionados se centran en reducir el 22% de las emisiones de GEI y poco más de la mitad de las emisiones de carbono negro para el año 2030, en un escenario de mercado usual. Los compromisos condicionados contribuirán a la reducción de poco más de una tercera parte de las emisiones de GEI y cerca de dos terceras partes de las emisiones de carbono negro, para el mismo año y escenario que los no condicionados (Gobierno de México y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2020).

Debido al carácter jurídicamente vinculante del Acuerdo de París, para el cumplimiento de sus contribuciones NDC, México ha introducido adecuaciones normativas y ejecutivas necesarias como la Ley General de Cambio Climático (LGCC) expedida en 2012, con la que el país se convirtió en uno de los primeros países en contar con una legislación de cambio climático a nivel nacional (Altamirano et al., 2016). A la LGCC fueron reformadas diversas disposiciones en 2018; entre esos cambios destacan: establecimiento de bases para el cumplimiento del Acuerdo de París, se adoptaron las NDC donde se establecen los objetivos nacionales de mitigación y adaptación, se establece la generación de un Programa Nacional de Adaptación, se da el mandato de establecer un sistema de comercio de emisiones (mercado de carbono), y se reconoce la importancia de considerar los informes de evaluación del IPCC para la política de cambio climático (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018b).

Al respecto, Averchenkova y Guzman Luna (2018) enlistan los principales logros y retos que México ha alcanzado y enfrenta en materia ambiental:

- Principales logros:
 - Se han sentado las bases institucionales: con la LGCC se han establecido las bases para el desarrollo, transversalización e implementación de la agenda de cambio climático, promoviendo participación de estados y municipios.
 - Se han definido objetivos de largo plazo y se fortaleció la continuidad política independientemente de cuál sea el partido político en el gobierno.
 - La LGCC ha contribuido a elevar la conciencia política sobre cambio climático, mejorando el reconocimiento y comprensión de los beneficios a una transición baja en carbono y los vínculos con el cambio climático.

- La transición energética baja en carbono ha avanzado: los objetivos de energía limpia y reducción de emisiones han facilitado las reformas energéticas, como la Ley de Transición Energética de 2015, que exigió el objetivo de 35% de generación de electricidad a partir de energía limpia. Posteriormente, la Estrategia de Transición Energética estableció metas a de largo plazo para la generación de electricidad limpia, de 37.7% para el 2030 y 50% para el 2050.
- Principales retos:
 - Los mandatos, al ser poco claros desafían la coordinación y la implementación: aunque la LGCC define las responsabilidades generales, no establece mandatos suficientemente claros ni pautas de implementación para las instituciones responsables, lo que implica falta de objetivos específicos.
 - Mecanismos de rendición de cuentas débiles: ningún organismo está claramente encargado de la rendición de cuentas y la aplicación de monitorear la implementación es ambigua, el Consejo Consultivo sobre Cambio Climático ha sido ineficaz por falta de estrategia y presupuesto asignado.
 - Falta de presupuesto: no se ha establecido una estrategia de financiamiento efectiva.
 - Existen importantes brechas en el compromiso político y el liderazgo, incluyendo una fuerte oposición de empresas intensivas en combustibles fósiles retrasa la implementación de la ley.

Los esfuerzos desarrollados por México para combatir los efectos del cambio climático han sido reconocidos a nivel nacional e internacional, sin embargo, su posición como líder mundial en este sentido es a menudo acusada de ser “el resultado de su propia glorificación en lugar de metas y objetivos concretos y ambiciosos” (Silva Rodríguez de San Miguel, 2018, p. 1053). Esta perspectiva está en línea con el análisis de Pischke et al. (2019), quienes elaboraron un índice de actividad política federal y estatal en materia de energía renovable sobre el periodo 1998-2015, en cuyo estudio México obtuvo un puntaje bajo en todas las medidas de intensidad de política evaluadas, a pesar de contar con la producción de políticas más densa de cualquier país latinoamericano.

De la misma manera, Ruz Saldívar y Ulloa Cuéllar (2019) indican que no se han creado medidas cuantitativas que permitan identificar las acciones concretas necesarias para reducir la emisión de GEI, además de que la vigilancia y monitoreo del cumplimiento de las normas es deficiente; otra crítica a la legislación ambiental se encuentra en Solorio Sandoval et al. (2020) quienes señalan que tanto la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC) como el Sistema Nacional de Cambio Climático (SINACC) como instrumentos organizacionales encargados de garantizar la implementación de la política nacional de cambio climático han carecido de la regularidad establecida por la LGCC y del liderazgo político necesario para cumplir con sus objetivos de coordinación. Silva Rodríguez de San Miguel (2018) puntualiza que el tema de mitigación y adaptación requiere un desarrollo de capacidades científicas y técnicas, lo que implica el desarrollo de nuevas instituciones y relaciones entre la academia, el gobierno y la sociedad. Se requiere, señala, desesperadamente más investigación empírica sobre los esfuerzos de cambio climático de México para determinar una comprensión más equilibrada.

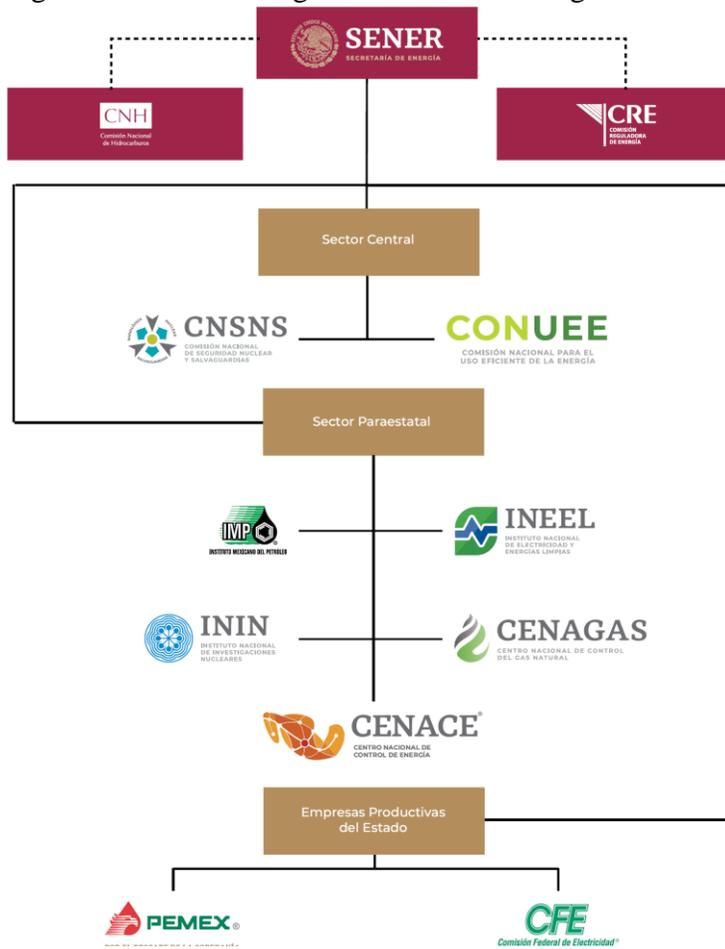
En este contexto, conocer el marco legislativo en materia ambiental, su estructura, evolución e implementación en un país nos permite comprender la disposición, retos y oportunidades que se presentan para la adopción de energías limpias en un marco que busque la reducción de emisiones de GEI, en caso de existir los incentivos económicos pertinentes para

ello. Por ejemplo, la reforma a la LGCC de 2018 que reafirma el compromiso de México con el Acuerdo de París implica el desacoplamiento de las emisiones de GEI del crecimiento del producto, aunque al mismo tiempo, se especifica que establecer una línea base de emisiones no debe limitar el crecimiento económico del país (García Hernández & Lucatello, 2022).

Entender la estructura interna del sector energético de cada país es clave para analizar el grado de dependencia económica con las actividades relacionadas al consumo y producción de energía; esta tarea también nos permite un acercamiento a la estructura de costos que cada país presenta en este mercado, lo cual a su vez nos brinda una perspectiva de las capacidades (tanto de recursos como de tecnología) e incentivos económicos para la transición a una economía de energías limpias. En el caso de México, el gobierno es un actor clave en este entendimiento.

En México, la estructura orgánica del sector energético (figura 8) se divide en tres sectores institucionales: el sector central que incluye a la Secretaría de Energía (SENER), la Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH) y a la Comisión Reguladora de Energía (CRE), en un primer nivel orgánico; así como a la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS), y la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), ambos órganos desconcentrados de la SENER, en un segundo nivel. El sector paraestatal está comprendido por el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), el Centro Nacional de Control del Gas Natural (CENAGAS), y el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE). Por otra parte, las empresas Productivas del Estado, Petróleos Mexicanos (Pemex) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Figura 8. Estructura orgánica del sector energético en México



Fuente: Secretaría de Energía (2021).

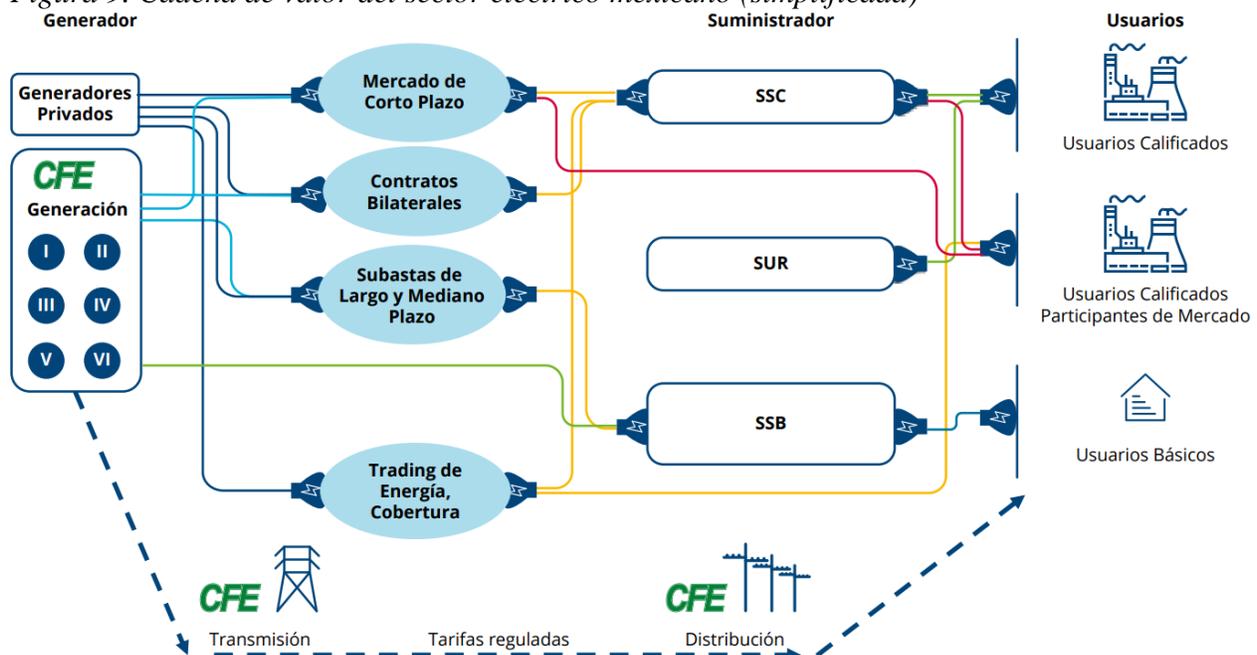
En términos agregados, el sector energético en México refiere al sector de hidrocarburos y al sector electricidad. Por una parte, el sector hidrocarburos se conforma por las actividades de exploración y extracción de petróleo, refinación, petroquímica, transporte, almacenamiento, distribución y expendio al público (Flores Quiroga, 2018).

Por otra parte, el sector electricidad se conforma de las actividades de generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica. En este contexto, en el año 2014, se abrogó la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (LSPEE), con lo que se introdujo la Ley de la Industria Eléctrica (LIE) y a la Ley de la Comisión Federal de Electricidad, que forman las bases de lo que hoy es el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM). Así, la estructura de la industria quedó definida por las siguientes categorías (Limón Portillo, s/f): Generadores, Operador, regulador y productos del mercado, Comercializadores, y Usuarios. A su vez, el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) está conformado por cinco submercados, donde se comercian productos/servicios diferentes (Centro Nacional de Control de Energía, 2018):

- Mercado Eléctrico Mayorista
 - Energía
 - Subastas de Mediano y Largo Plazo
 - Mercado Spot

- Servicios Conexos
- Mercado Spot
- Potencia
- Mercado de Balance de Potencia
- Subastas de Mediano y Largo Plazo
- Derechos Financieros de Transmisión (DFT)
- Contratos Legados
- Subastas de DFT
- Certificados de Energía Limpia (CEL)
- Subastas de Largo Plazo
- Subastas Anuales

Figura 9. Cadena de valor del sector eléctrico mexicano (simplificada)



Fuente: EY con información de la CFE y CENACE (2018, p. 50).

Nota: SSC: Suministrador de Servicios Calificados, SUR: Suministrador de Último Recurso, SSB: Suministrador de Servicios Básicos.

Por otra parte, la administración pública del sector energético mexicano tiene su fundamento constitucional en los artículos 25, 27, 28, 73, 89 y 90. Por supuesto, la intervención del Estado mexicano en este sector a lo largo de la historia ha tenido varias etapas y la misma ha cambiado de acuerdo con las estrategias de cada gobierno para cumplir con los ordenamientos constitucionales. Brevemente recordemos que en un principio la intervención estatal era mínima, ya que dicho sector se encontraba bajo el control de agentes privados, a partir de lo cual la intervención cobró fuerza durante la presidencia del General Lázaro Cárdenas, con la expropiación de la industria petrolera, la nacionalización de la industria eléctrica y la creación de Petróleos Mexicanos (PEMEX) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE) como instituciones a cargo de estas industrias, respectivamente.

El cambio en el marco regulatorio más importante en años recientes ha sido el de la reforma energética de 2013, con la cual se modificó el ámbito de participación del Estado en el funcionamiento del sistema energético nacional. Aguilera et al. (2016) describen este cambio del siguiente modo: en primer lugar, la reforma restringió la propiedad de la Nación a los hidrocarburos alojados en el subsuelo; asimismo, se acotó la actividad del Estado a la exploración y extracción; también se incluyó la apertura a la participación de los agentes privados en estas actividades, y se asignaron a la extracción de hidrocarburos el objetivo de maximizar los ingresos del gobierno para financiar el desarrollo económico en el largo plazo. Los cambios constitucionales fueron motivados con el propósito de establecer mercados en los que agentes privados pudieran participar con inversiones y tecnología a la vez que asumieran parte del riesgo, para así ampliar la oferta de energía destinada al mercado interno y de exportación.

Un punto clave para entender el impacto que ha tenido la reforma energética de 2013 fue la modificación al artículo 25 constitucional, que consistió en convertir a Pemex y CFE de organismos públicos descentralizados a empresas productivas del Estado (EPE); asimismo, el cambio fundamental en el artículo 27 autoriza constitucionalmente contratos y concesiones⁹ a empresas privadas. Del mismo modo, Vargas Suárez (2015) señala que al modificarse el artículo 28 constitucional se eliminó la facultad exclusiva de la Nación para llevar a cabo para llevar a cabo la explotación de petróleo y demás hidrocarburos, así como actividades de generación, conducción, transformación, distribución y abastecimiento de energía eléctrica.

Del Río Monges et al. (2017) identificaron una serie de problemáticas del sector energético en México dentro del marco de la Reforma Energética que entró en vigor en 2015, este diagnóstico incluye los siguientes problemas en el subsector hidrocarburos: caídas en plataforma de producción y exportación, dependencias de las importaciones de gas natural y derivados del petróleo, la riqueza petrolera no se aprovecha de manera intertemporal, y posible escenario de menor uso de petróleo como fuente de energía. Por otra parte, en el subsector eléctrico identificaron obstáculos para incrementar la eficiencia y competitividad del subsector eléctrico. En la Tabla 4 exponemos una serie de indicadores pertinentes para evaluar la evolución de estas problemáticas y el impacto que la Reforma Energética ha tenido en las mismas, se incluyeron los años 2014, ya que fue a finales de 2013 cuando se aprobó la reforma constitucional, el año 2018, que implica efectos de corto plazo, pero no afectados por la crisis económica y sanitaria de finales de 2019; asimismo, incluimos el año 2021 como referencia del efecto que dicha crisis pudo presentar. En los indicadores de tarifas eléctricas se incluyó la comparativa con el año 2017, debido a que la regulación actual ya no corresponde a la estructura de los cuadros tarifarios.

En primer lugar, la problemática de la caída en las plataformas de producción y exportación se sostiene, ya que en 2018 se observa una caída pronunciada (25.5%) de la producción de petróleo, acompañado de un ligero crecimiento en las exportaciones (3.8%), estos porcentajes, sin embargo, se pronunciaron en declive respecto al 2021. En segundo lugar, la dependencia de las importaciones de gas natural y derivados del petróleo también se mantiene, pues a los 4 años de la reforma la producción de gas natural disminuyó en proporciones similares

⁹ Contratos de licencia.

a la del petróleo, aunque las importaciones también descendieron, pero lo hicieron levemente (3%); no obstante, la razón de dependencia del gas natural extranjero se incrementó en cerca de diez puntos porcentuales en el mismo periodo. Asimismo, tanto la producción como la importación de gas licuado ha disminuido, no solo como resultado de la crisis; también la razón de dependencia con otros países de este energético ha incrementado desde que se aprobó la reforma; la importación de gasolina a su vez se incrementó en más de 60%, y la razón de dependencia extranjera también aumentó considerablemente (229.7%), aunque esta cifra se moderó en 2021 derivado de la crisis (66.4%). En tercer lugar, podemos enfatizar que los ingresos petroleros han disminuido en cuanto a su participación de los ingresos presupuestarios públicos, y por su parte, el consumo de combustibles fósiles ha disminuido moderadamente, salvo el Diesel cuyo uso se ha intensificado inclusive en un año de la crisis (2020). Por último, los obstáculos para incrementar la eficiencia y competitividad del subsector eléctrico aún se presentan, aunque hay ventanas de oportunidad que se están aprovechando, por la importación de energía eléctrica representó niveles mayores a los del inicio de la reforma, tanto en 2018 como en 2021, y las pérdidas de electricidad si bien decayeron en 2021, en 2018 habían aumentado (14.8%). Aunque las tarifas han incrementado en general, la capacidad de generación de energía eléctrica ha presentado un crecimiento sostenido.

En marzo de 2021 se publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) un decreto por el que “se reforman y adicionan diversas disposiciones de la ley de la industria eléctrica” (Diario Oficial de la Federación, 2021). De los 169 artículos permanentes y 24 artículos transitorios, la reforma a la LIE no implicó el reordenamiento de dicha ley completamente, si no que solo planteó cambios en fracciones de los artículos 3,4,12,26,35,53,101,108 y 26. En este contexto, resulta ilustrativo observar el análisis comparativo de la reforma energética de 2013 y la reforma a la LIE de 2021 elaborado por García García et al. (2021).

Por su parte, García Alcocer (2021) identifica cinco aspectos relevantes de la reforma eléctrica de 2021 en los siguientes términos: el primer aspecto es la modificación del despacho por mérito económico, por uno que atiende primero a las plantas de la CFE, sin considerar costos, el cual como consecuencia puede implicar mayores emisiones contaminantes como emisiones de GEI. El segundo aspecto refiere a que CFE no estaría obligada a adquirir energía y potencia mediante las subastas de contratos de cobertura, ya que estas serían optativas. Un tercer aspecto implica que la Comisión Reguladora de Energía (CRE) gozaría de discreción para negar permisos eléctricos con base en la planeación de la Secretaría de Energía. Un cuarto aspecto consiste en aplicar la reforma de manera retroactiva a los permisionarios de sociedades de autoabastecimiento y a los productores independientes de energía (PIE), mismos que cuentan con plantas bajo la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (LSPEE) vigente entre 1992 y 2014. Finalmente, el quinto aspecto hace alusión a la posibilidad de otorgar certificados de energía limpia a plantas construidas con anterioridad a 2014, el cual podría desestimular la construcción de nueva infraestructura de energía limpia.

Al respecto de las críticas —por ejemplo, las citadas por Clavellina Miller y Perea Corona (2022) y por Clavellina Miller (2021)— que se han planteado a la reforma de la LIE (2021), Gutiérrez Negrín (2021) sostiene que las misma no atenta contra la libre competencia en la industria eléctrica, sino que busca equilibrar la competencia promoviendo igualdad de oportunidades a las plantas públicas y a las privadas.

Terminamos esta sección mencionando que en septiembre de 2021 la Cámara de Diputados recibió una iniciativa de reforma constitucional relacionada con el sector energético (Cámara de Diputados, 2021), con la que se buscaba reformar los artículos 25, 27 y 28 constitucionales. Ruiz et al. (2021) puntualizan que esta iniciativa pretendía consolidar el control de las actividades del sector eléctrico, siendo un cambio estructural que Pemex y la CFE pasarían a ser consideradas entidades gubernamentales, en lugar de empresas productivas del estado, lo cual implicaría la extinción de facultades del Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), la Comisión Reguladora de Energía (CRE) y la Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH), que serían asumidas por la SENER. Asimismo, señalan que dicha reforma cancelaría permisos de generación de energía, así como contratos de compraventa de electricidad en vigor, así como otorgar el derecho a la CFE de generar al menos el 54% de la energía de México. No obstante, este dictamen fue rechazado (Canal del Congreso, 2022).

Tabla 4. Indicadores para el seguimiento del impacto de la Reforma Energética en la solución de la situación problemática del sector energético en México

Subsector	Hidrocarburos						
Problema	Indicador	Unidades	2014	2018	2021	Tasa de crecimiento (2014-2018)	Tasa de crecimiento (2014-2021)
Caídas en plataforma de producción y exportación	Producción de petróleo	Miles de barriles diarios (acumulado)	29,150.6	21,721.8	19,977.8	-25.5%	-31.5%
	Exportación de petróleo		13,717.9	14,232.8	12,218.2	3.8%	-10.9%
Dependencias de las importaciones de gas natural y derivados del petróleo	Producción de gas natural	Millones de pies cúbicos diarios (acumulado)	78,381.8	58,163.6	56,963.6	-25.8%	-27.3%
	Importaciones de gas natural		16,296.2	15,814.4	10,853.2	-3.0%	-33.4%
	Importaciones de gas natural/Producción de gas natural	Ratio	0.2	0.3	0.2	30.8%	-8.4%
	Producción de gas licuado	Miles de barriles diarios (acumulado)	2,465.3	1,467.4	1,106.0	-40.5%	-55.1%
	Importación de gas licuado		1,015.9	740.8	803.1	-27.1%	-20.9%
	Importaciones de gas licuado/Producción de gas licuado	Ratio	0.4	0.5	0.7	22.5%	76.2%
	Producción de gasolina	Miles de barriles diarios (acumulado)	5,057.7	2,482.7	2,794.3	-50.9%	-44.8%
	Importación de gasolina		4,437.3	7,180.4	4,079.6	61.8%	-8.1%

	Importación de gasolina/Producción de gasolina	Ratio	0.9	2.9	1.5	229.7%	66.4%
--	--	-------	-----	-----	-----	--------	-------

Tabla 4. Indicadores para el seguimiento del impacto de la Reforma Energética en la solución de la situación problemática del sector energético en México

Subsector	Hidrocarburos (continuación)							
Problema	Indicador	Unidades	2014	2018	2021	Tasa de crecimiento (2014-2018)	Tasa de crecimiento (2014-2021)	
La riqueza petrolera no se aprovecha de manera intertemporal	Reserva de largo plazo del Fondo Mexicano del Petróleo	Millones de dólares	n.a.	1,005.5	12,998.6	n.a.	n.a.	
Posible escenario de menor uso de petróleo como fuente de energía	Proporción que representan los ingresos petroleros de los ingresos presupuestos públicos totales	Ratio	3.7	2.3	2.3	-38.5%	-39.1%	
	Consumo de combustibles para la generación de electricidad							
		Indicador	Unidades	2014	2018	2020	Tasa de crecimiento (2014-2018)	Tasa de crecimiento (2014-2020)
		Combustóleo	Litros	6,433,334,929.0	6,382,078,988.0	3,319,117,536.8	-0.8%	-48.4%
		Diesel		330,691,553.0	687,049,115.0	469,454,528.5	107.8%	42.0%
	Carbón	Kilogramos	15,529,404,847.0	13,799,686,507.0	5,589,912,219.0	-11.1%	-64.0%	

	Gas Natural	Metros cúbicos	13,550,839,210.2	15,361,311,358.9	12,205,524,962.6	13.4%	-9.9%
--	-------------	-------------------	------------------	------------------	------------------	-------	-------

Tabla 4. Indicadores para el seguimiento del impacto de la Reforma Energética en la solución de la situación problemática del sector energético en México

Subsector	Eléctrico						
Problema	Indicador	Unidades	2014	2018	2021	Tasa de crecimiento (2014-2018)	Tasa de crecimiento (2014-2021)
Obstáculos para incrementar la eficiencia y competitividad del subsector eléctrico	Generación total de energía eléctrica	Gigawatts-hora (acumuladas)	303,315.8	349,299.0	325,726.7	15.2%	7.4%
	Importación de energía eléctrica		2,539.3	3,940.3	9,965.1	55.2%	292.4%
	Importación de energía eléctrica/Generación total de energía eléctrica	Ratio	0.0084	0.0113	0.0306	34.7%	265.4%
	Perdidas de electricidad	Gigawatts-hora (acumuladas)	41,321.5230	54,616.9380	35,440.1564	32.2%	-14.2%
	Perdidas de electricidad/Generación total de electricidad	Ratio	0.1362	0.1564	0.1088	14.8%	-20.1%
	Capacidad instalada de la industria eléctrica	Megawatts	65,392.3191	70,315.9000	86,812.3000	7.5%	32.8%
	Tarifas eléctricas						
	Indicador	Unidades	2014	2017	2021	Tasa de crecimiento (2014-2017)	Tasa de crecimiento (2014-2021)

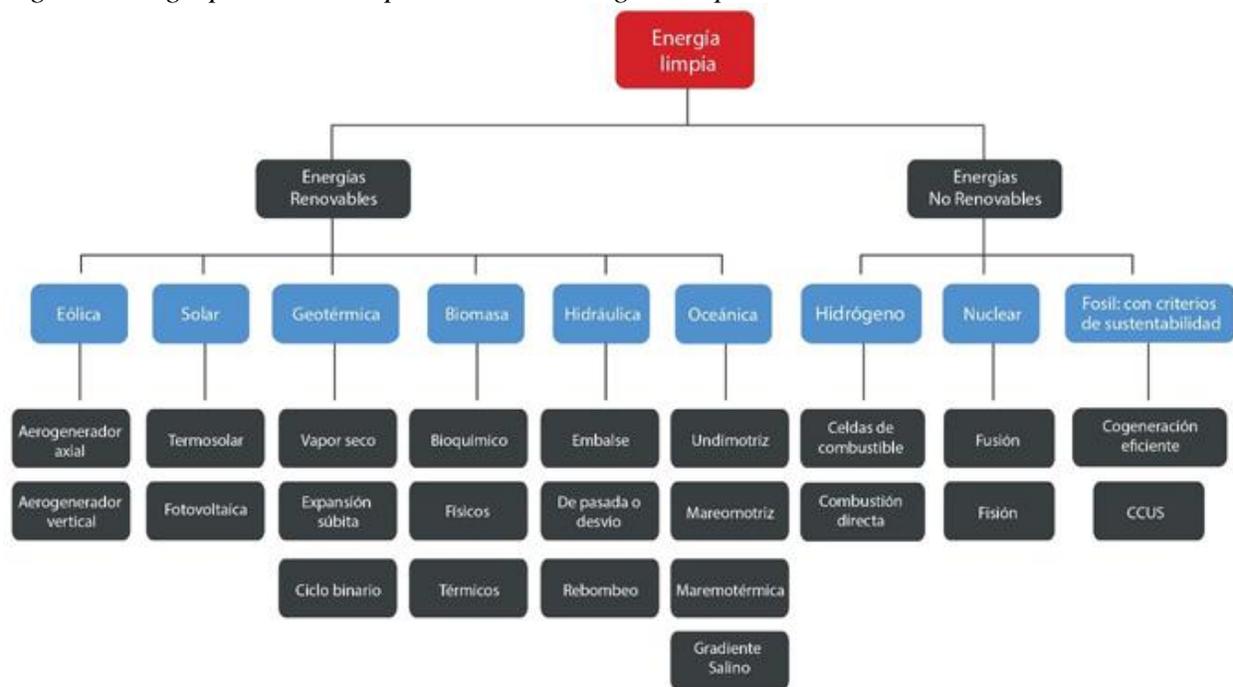
	Totales	Centavos por kilowatts-hora (promedio)	158.1	165.4	n.a.	4.6%	n.a.
	Servicios		235.7	284.2	n.a.	20.6%	n.a.
	Comerciales		303.6	345.4	n.a.	13.8%	n.a.
	Agrícolas		48.8	60.6	n.a.	24.3%	n.a.
	Industriales		161.6	168.1	n.a.	4.0%	n.a.
	Empresa mediana		174.6	181.0	n.a.	3.7%	n.a.
	Gran industria		138.1	138.9	n.a.	0.6%	n.a.

Fuente: Elaboración propia con información del Sistema de Información Energética de la Secretaría de Energía, datos de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público y del Fondo Mexicano del Petróleo.

La LIE en su artículo 3°, fracción XXII define —para fines de la legislación mexicana— las energías limpias como "Aquellas fuentes de energía y procesos de generación de electricidad cuyas emisiones o residuos, cuando los haya, no rebasen los umbrales establecidos en las disposiciones reglamentarias que para tal efecto se expidan" (*Ley de la Industria Eléctrica*, 2021). Estos umbrales a los que refiere la fracción refieren a la eficiencia mínima de la tecnología empleada para la producción de energía equivalente a una tasa de emisiones no mayor a 100 kg/MWh¹⁰ (Comisión Reguladora de Energía, 2016).

Las fuentes de energía primarias se pueden clasificar en renovables y no renovables. Las fuentes renovables de energía se definen como la "energía disponible a partir de procesos permanentes y naturales, con posibilidades técnicas de ser explotadas económicamente" Secretaría de Energía (2018), las fuentes no renovables son aquéllas que "se extraen de los depósitos geológicos que se formaron a partir de biomasa, así como los combustibles secundarios producidos a partir de un combustible fósil". El listado de energías limpias de la LIE incluye tanto energías renovables como no renovables, al respecto la SEMARNAT (2018a) ofrece un diagrama (Figura 10) que sintetiza la clasificación de energías limpias en estos dos tipos.

Figura 10. Agrupación correspondiente de energías limpias



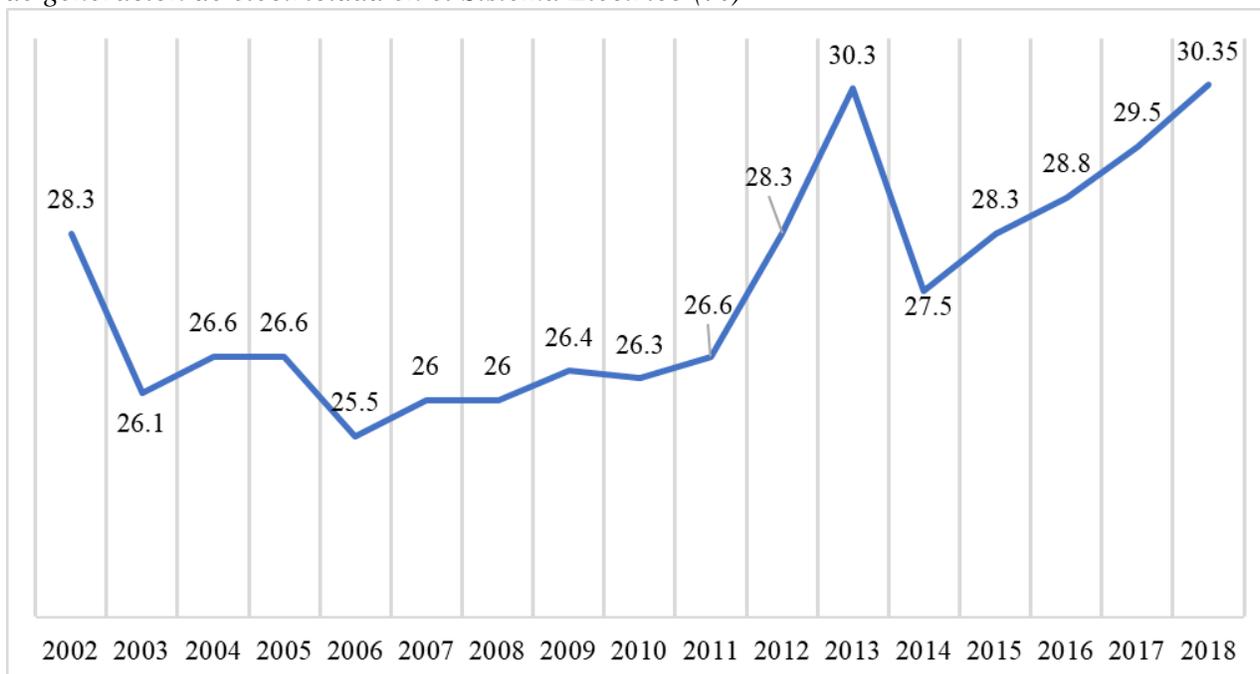
Fuente: SEMARNAT (2018a) con información de la SENER y el Inventario Nacional de Energías Limpias (INEL).

En una economía, el patrón energético queda definido por el tipo de energía que se utiliza en los procesos productivos (Vázquez, 2015). En México, la participación de energías renovables y tecnologías limpias en la capacidad instalada del SEN incrementó considerablemente en el

¹⁰ Kilogramos por megawatt-hora.

periodo 2002-2018, a pesar de haber presentado una caída considerable hacia 2006 (25.5%), para luego alcanzar un máximo histórico en 2013 (30.3%), el cual, luego de una moderada disminución, fue el mismo nivel en 2018. Al respecto, México disminuyó la generación de carbón para la generación eléctrica en 60% en el periodo 2015-2020, cifra se redujo en 48% en 2019/2020, con lo que lideró la caída de carbón como fuente energética entre los países del G20¹¹, en un contexto de caída de la demanda (Fulghum, 2021).

Figura 11. Participación de energías renovables y tecnologías limpias en capacidad instalada de generación de electricidad en el Sistema Eléctrico (%)



Fuente: Elaboración con datos del Sistema de Información Energética de la Secretaría de Energía.

México es un país abundante en recursos solares, eólicos, de biomasa, hidroeléctricos y geotérmicos, por lo que resulta ser una situación desafortunada que la nación no sea un líder mundial en el ámbito de las fuentes de energías renovables (Silva Rodríguez de San Miguel, 2019). A pesar de que a partir de las reformas estructurales del año 2013, se han operado cambios que impulsan la inversión privada y la promoción del uso de tecnologías alternativas a los combustibles fósiles (Correa López, 2018), México aún enfrenta una serie de retos para que dichas tecnologías incrementen su participación en la generación de energía. Del Río Monges & Aburto Martínez (2018) señalan que México tiene la oportunidad de adaptarse de forma gradual a la tercera revolución energética, que consistirá en el desplazamiento del petróleo como la principal fuente de energía a nivel mundial en favor de las energías renovables y limpias. Sin embargo, afirman que existen áreas de oportunidad a nivel de legislación y de políticas públicas para facilitar dicho proceso de adaptación en relación con la reducción de su dependencia

¹¹ El G20 es una plataforma multilateral estratégica que conecta a las principales economías desarrolladas y emergentes del mundo.

energética respecto a los combustibles fósiles. Sobre este punto, Viscidi (2018) enlista una serie de recomendaciones para que el gobierno mexicano explote las oportunidades para expandir el uso de energías renovables.

A su vez, en un documento de trabajo del Fondo Monetario Internacional (FMI), Raissi et al. (2021) proponen una estrategia integral para implementar los compromisos climáticos de mitigación de México, basada en el incremento progresivo del precio del carbono (impuestos) para elevar los precios de los combustibles fósiles y la electricidad, aunado a instrumentos sectoriales y políticas complementarias.

Dentro de los beneficios en la implementación de energías renovables podemos citar el análisis econométrico de Mele (2019) cuyos resultados muestran que el PIB real de México está impulsado por el consumo de este tipo de energías. Otro incentivo económico es que la energía renovable no solo reduce las emisiones de CO₂, sino que en el corto plazo, el uso de esta energía fomenta la apreciación del tipo de cambio en México, como lo descubrieron Deka y Dube (2021) con un modelo Autorregresivo de Rezagos Distribuidos (ARDL, por sus siglas en inglés) de corto plazo. Por su parte, también utilizando un modelo ARDL, Catalán (2020) encontró que tanto el ingreso como las energías no renovables son las variables que explican la evolución de las emisiones de GEI a largo plazo, reportando elasticidades positivas, siendo de estas, la energía no renovable la que tiene un mayor impacto.

Por otra parte, existe evidencia mixta sobre la relación entre el crecimiento del ingreso y la producción de energía renovable, Vural (2021) concluye que, en países latinoamericanos efectivamente, el PIB per cápita y la innovación tecnológica, así como el comercio tienen una relación positiva significativa en el impacto de la producción de energía renovable per cápita, mientras que Alvarado et al. (2021) obtuvieron como resultado que en países de la OCDE, el desarrollo económico no reduce el consumo de energía de fuentes fósiles y que de hecho, el capital humano (medido en años de estudio y educación) disminuye el consumo de energías no renovables.

Finalmente, hacer caso omiso de las recomendaciones en materia ambiental podría tener efectos negativos en la economía, es tal esta urgencia que bancos centrales han admitido la importancia de reconocer el cambio climático para preservar la estabilidad financiera y monetaria de las naciones (ver Grippa et al., 2019). Para el caso de México, Marmolejo-Cervantes (2019) desarrolló e ilustró el modelo Cadena de no pago por efectos del cambio climático¹², con el que anticipa una serie de eventos potencialmente destructivos y desafortunados que podrían ocurrir si el Banco de México no implementara medidas regulatorias para salvaguardar el sistema financiero nacional, con lo que el banco central debería participar activamente como un actor y consultor del Gobierno Federal al reconocer como materia urgente, que el cambio climático es un riesgo para la estabilidad financiera en México.

¹² *Non-Payment Chain Due to Climate-Change Effects.*

5. Impacto económico de las emisiones de gases de efecto invernadero

En esta sección presentamos las variables que conforman el panel de datos de 86 países para el periodo 1990-2019 (30 años) construido para entender el fenómeno en cuestión; realizamos un análisis exploratorio que nos permite resultados descriptivos y utilizamos modelaje econométrico para analizar la relación entre las variables de elección, las emisiones de gases de efecto invernadero y su impacto en el crecimiento económico. Asimismo, se presentan los resultados y conclusiones de la investigación.

Como describimos antes, el protocolo de Kyoto representó el primer gran esfuerzo a nivel internacional por abordar el problema advertido por la comunidad científica respecto de las emisiones de GEI. Además, el protocolo puso en marcha la CMNUCC, la cual a su vez tiene el objetivo de estabilizar la concentración de gases de efecto invernadero a niveles que prevengan interferencia antropógena peligrosa con el sistema climático, buscando siempre que dicha estabilización asegure que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible. Es en este contexto que nos interesamos en estudiar la relación que guarda la emisión de GEI con el crecimiento económico, y en particular, buscamos medir su impacto.

Requerimos para nuestro análisis la información de emisiones de GEI a nivel internacional, la cual comenzó a medirse precisamente en el año que el protocolo de Kyoto tomó como referencia para el objetivo de reducción de las emisiones, es decir, contamos con datos a partir del año 1990. Recordemos también que el primer periodo de compromiso del protocolo consideró el lapso de 1990 a 2008-2012, y por su parte, el segundo periodo de compromiso que fue adoptado mediante la enmienda de Doha, el cual comprendió el periodo 2013-2020; no obstante, la información disponible que se reporta a la CMNUCC se presenta con dos a tres años de rezago (ver World Resources Institute, 2022), por lo que a la fecha (diciembre de 2022), contamos con datos hacia 2019. Con esto tenemos datos sobre 30 años de emisiones de efecto invernadero, el cual es un número pertinente de observaciones para el modelo econométrico que analizaremos.

Los datos de emisiones de GEI fueron rescatados por el Banco Mundial del *Climate Watch* del World Resources Institute (ver Climate Watch, 2020) para su agregación, de modo que trabajamos con el total de emisiones de GEI de cada país, que incluye emisiones de los seis gases contemplados por el protocolo de Kyoto, recordemos que estos son CO₂, CH₄, N₂O, y los F-gases (HFC, PFC, y SF₆). La unidad de medida son kilotoneladas de CO₂eq.

Asimismo, como lo sugiere el título de la tesis, requerimos información del crecimiento económico, el cual mediremos en términos del PIB, tomando información para los 30 años que estudiaremos. Del mismo modo, agrupamos la información de los países por niveles de ingreso, incluyendo cuatro grupos categóricos, a saber, alto (H), medio alto (UM), medio bajo (LM), y bajo (L). La clasificación considera el Ingreso Nacional Bruto (GNI) per cápita de cada país, se cuenta con el dato para cada año y fue elaborada por el Banco Mundial utilizando la metodología Atlas (ver World Bank, 2022).

En este respecto, se mencionó anteriormente la relevancia de entender la estructura económica de cada país, pues los sectores económicos contribuyen a ambas variables de interés,

esto es, el crecimiento y las emisiones de GEI, por lo que hemos tomado también datos sobre la estructura de mercado basado en los tres mayores sectores de la economía: agricultura, silvicultura y pesca, industria (incluyendo la construcción), y servicios.

Otra variable de interés es la población, pues la preocupación internacional de reducir las emisiones de GEI surgió a partir de la concentración de GEI en la atmósfera proveniente de actividades antropogénicas, como se expuso antes. De este modo, el crecimiento de la población urbana también resulta ser un factor clave en el entendimiento de la relación de crecimiento económico y contaminantes por GEI, pues la relación entre PIB y emisiones de CO₂ y urbanización ha sido estudiada a nivel internacional para muestras de países similares a la nuestra, encontrándose resultados significativos (ver Santillán-Salgado et al., 2020; Valencia-Herrera et al., 2020). Como complemento tomamos datos de la población rural, con fines comparativos.

Por su parte, realizamos consideraciones importantes sobre los datos de consumo y producción de energía, generación de energía eléctrica por tipo de combustible, entre otros. La información del sector energético fue rescatada de la Administración de Información Energética de Estados Unidos (EIA, por sus siglas en inglés).

Los datos analizados son de periodicidad anual y contemplan el periodo 1990-2019 (30 años). Contamos con información para una muestra de 86 países. Los países de elección para la muestra son aquellos con los que se cuentan los datos concurrentes para los 30 años de las variables de estudio, de modo que se construyó un panel de datos balanceado. Como mencionamos, para cada país y año se cuenta con la clasificación por grupo de ingreso, y hemos rescatado —aunque no es central en la investigación, la información de región geográfica para cada país del Banco Mundial, con lo que tenemos seis regiones en las que se distribuyen los países, estas son Asia oriental y el Pacífico, Europa y Asia central, América Latina y el Caribe, Oriente Medio y Norte de África, Asia del Sur, y África subsahariana.

En la Tabla 5 se detallan las variables que hemos analizado para entender el fenómeno de interés, sin que esto implique que todos los datos fueron usados para el modelaje econométrico que se presenta en la siguiente sección.

Tabla 5. Variables analizadas

Variable	Definición	Derivaciones	Unidad de medida		Nomenclatura	Fuente
PIB	Suma del valor agregado de la producción de un país	Total	Dólares	constantes	gdp_us15	Banco Mundial
		Tasa de crecimiento	Porcentaje		gdp_r	Banco Mundial
		Per cápita	Dólares	constantes	gdp_pc_usd15	Banco Mundial
		Crecimiento	per	Porcentaje	gdp_pc_r	Banco Mundial
GEI	Suma de las emisiones de los gases contemplados por el Protocolo de Kyoto (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFC, PFC, y SF ₆)	Total	ktCO ₂ eq		ghg_ktco2eq	Banco Mundial
		Crecimiento	Porcentaje		ghg_r	Elaboración
		Crecimiento cuadrático	Porcentaje		ghg_r_sqrt	Elaboración
		Per cápita	ktCO ₂ eq		ghg_pc_ktco2eq	Elaboración
		Crecimiento	per	Porcentaje	ghg_pc_r	Elaboración
Población	Residentes de un país, independientemente de su estatus legal o ciudadanía (estimaciones a mitad de año)	Total	Número de personas		pop_total	Banco Mundial
		Crecimiento	Porcentaje		pop_r	Banco Mundial
		Población urbana	Número de personas		urban_total	Banco Mundial
		Población rural	Número de personas		rural_total	Banco Mundial
		Crecimiento (Urbana)	Porcentaje		urban_r	Banco Mundial
		Crecimiento (Rural)	Porcentaje		rural_r	Banco Mundial
Agricultura, silvicultura y pesca	Valor agregado del sector (dólares constantes 2015)	Crecimiento	Porcentaje		agro_r	Banco Mundial
Industria (incluida la construcción)	Valor agregado del sector (dólares constantes 2015)	Crecimiento	Porcentaje		industry_r	Banco Mundial
Servicios	Valor agregado del sector (dólares constantes 2015)	Crecimiento	Porcentaje		services_r	Banco Mundial

Tabla 5. Variables analizadas (continuación)

Variable	Definición	Derivaciones	Unidad de medida	Nomenclatura	Fuente
Consumo de energía	Uso de energía como fuente de calor, potencia o como materia prima de entrada en procesos de manufactura.	Total	quad Btu	energy_cons	EIA
		Crecimiento (total)	Porcentaje	energy_cons_r	Elaboración
		Proveniente de carbón	quad Btu	coal_cons	EIA
		Proveniente de gas natural	quad Btu	gas_cons	EIA
		Proveniente de petróleo y otros líquidos	quad Btu	oil_cons	EIA
		Proveniente de combustibles fósiles	quad Btu	fossil_cons	Elaboración
		Proveniente de fuentes renovables, nuclear y otras	quad Btu	renewables_cons	EIA
Producción de energía	Generación de energía cuyo proceso depende del tipo específico de energético	Total	quad Btu	energy_prod	EIA
		A partir de carbón	quad Btu	coal_prod	EIA
		A partir de gas natural	quad Btu	gas_prod	EIA
		A partir de petróleo y otros líquidos	quad Btu	oil_prod	EIA
		A partir de combustibles fósiles	quad Btu	fossil_prod	Elaboración
		A partir de fuentes renovables, nuclear y otras	quad Btu	renewables_prod	EIA

Tabla 5. Variables analizadas (continuación)

Variable	Definición	Derivaciones	Unidad de medida	Nomenclatura	Fuente
Generación de electricidad neta	Energía eléctrica producida al transformar otras formas de energía. Generación bruta menos	Total	Miles de millones de kWh	electricity_gen	EIA
		Combustibles fósiles	Miles de millones de kWh	electricity_fossil	EIA

	la energía eléctrica consumida en la(s) central(es) generadora(s) para el servicio de la estación o auxiliares.	Central de bombeo	Miles de millones de kWh	hydro_pump_gen	EIA
		Nuclear	Miles de millones de kWh	electricity_nuclear	EIA
		Energías renovables	Miles de millones de kWh	electricity_renewables	EIA
		Hidroelectricidad	Miles de millones de kWh	hydro_gen	EIA
		Geotérmica	Miles de millones de kWh	geo_gen	EIA
		Energía mareomotriz	Miles de millones de kWh	tide_wave_gen	EIA
		Eólica	Miles de millones de kWh	wind_gen	EIA
		Solar	Miles de millones de kWh	solar_gen	EIA
		Biomasa combustibles residuales	y Miles de millones de kWh	bio_gen	EIA
Rentabilidad de los recursos naturales	La contribución de los recursos naturales al producto económico	Total	Porcentaje del PIB	natural_rents	Banco Mundial
		Petróleo	Porcentaje del PIB	oil_rents	Banco Mundial
		Carbón	Porcentaje del PIB	coal_rents	Banco Mundial
		Gas natural	Porcentaje del PIB	gas_rents	Banco Mundial
		Recursos minerales	Porcentaje del PIB	mineral_rents	Banco Mundial
		Recursos forestales	Porcentaje del PIB	forest_rents	Banco Mundial

La distribución de información que analizamos, clasificada por grupos de ingreso y regiones se presenta en la tabla 6. Es importante notar que, aunque la clasificación regional no cambia en el tiempo, la categorización por ingreso varía de acuerdo con el cambio en el GNI per cápita que cada país reporta en un año en específico.

Tabla 6. Distribución de grupos de ingreso y regionales de la muestra

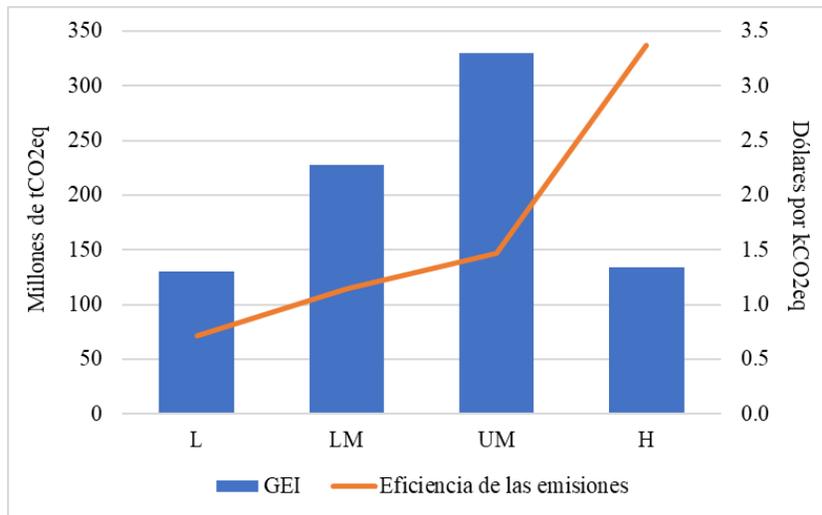
Ingreso	Asia oriental y el Pacífico	Europa y Asia central	América Latina y el Caribe	Oriente Medio y Norte de África	Asia del Sur	África subsahariana	Total
L	0.62%	0.00%	2.33%	0.19%	4.30%	18.80%	26.24%
LM	4.42%	1.05%	11.98%	4.50%	2.64%	7.21%	31.78%
UM	2.25%	1.28%	15.43%	1.67%	0.04%	5.12%	25.78%
H	2.02%	9.30%	3.99%	0.62%	0.00%	0.27%	16.20%
Total	9.30%	11.63%	33.72%	6.98%	6.98%	31.40%	100.00%

Al medir los datos de niveles de emisión de GEI contra los grupos de ingreso (Figura 12), se observa inmediatamente una relación que en primera instancia sugiere la verificación de la hipótesis de la CAK; recordemos que esta sostiene que en las primeras etapas del crecimiento económico aumentan las emisiones de GEI, pero a partir de cierto nivel de ingreso la tendencia se invierte.

Observamos que las emisiones de los países de ingreso bajo (L) son menores que las de los países de ingreso medio bajo (LM), y estos a su vez emiten menos GEI que los países de ingreso medio alto (UM), sin embargo, el punto de inflexión que alude a la CAK se identifica al notar que los países de ingreso alto (H) son los que emiten menores emisiones respecto del resto de grupos.

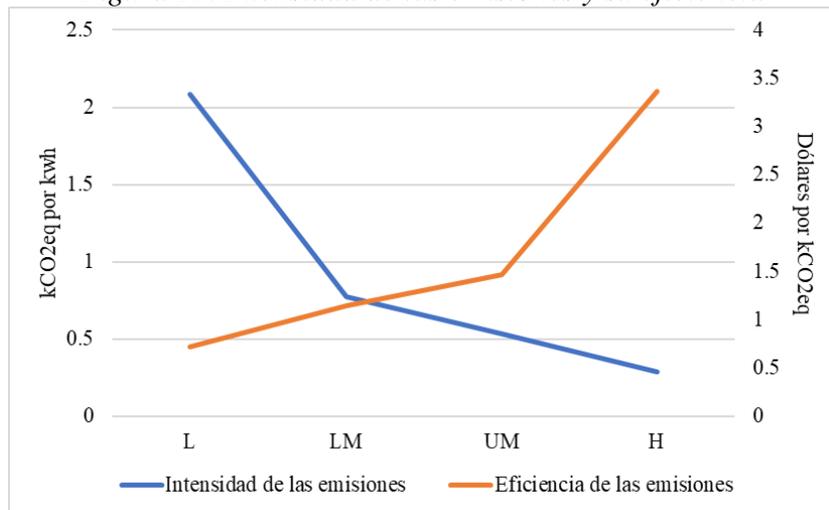
Asimismo, podemos explicar, en primera instancia, esta relación por medio de la eficiencia de las emisiones, es decir, cuántas emisiones se generan por unidad de PIB, siendo que conforme aumenta el ingreso la eficiencia es mayor (se emite menos con el aumento en el producto). La tendencia en la eficiencia energética también se refleja al observar la intensidad de las emisiones (Figura 13); encontramos que a mayor ingreso se tiene que el consumo de energía genera menos emisiones de CO₂eq, lo cual a su vez es un *proxy* de la tecnología empleada para la obtención de dicha energía, donde los países de ingreso mayor lideran esta adopción tecnológica, la cual permite un mayor rendimiento tanto en el producto como en el consumo, por un costo menor de contaminación, y a la vez, los países de menor ingreso, al no contar con tecnología eficiente generan energía a un mayor costo y con menor rendimiento. Este comportamiento se mantiene al observar la tendencia de los 30 años de estudio.

Figura 12. Emisiones de GEI por grupos de ingreso



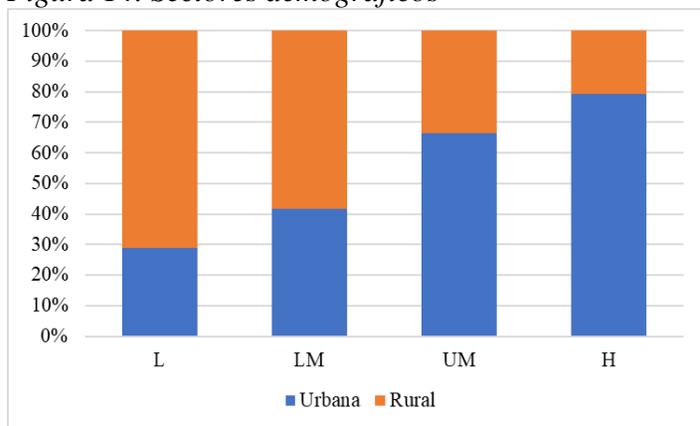
Fuente: Elaboración propia con datos del Banco Mundial.

Figura 13. Intensidad de las emisiones y su eficiencia



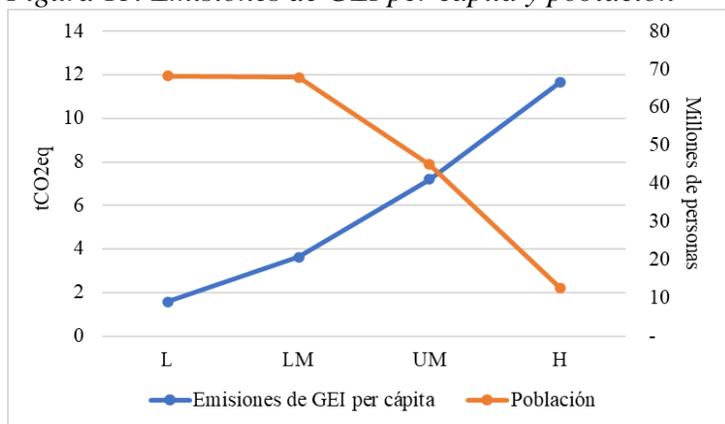
Fuente: Elaboración propia con datos del Banco Mundial y la EIA.

Figura 14. Sectores demográficos



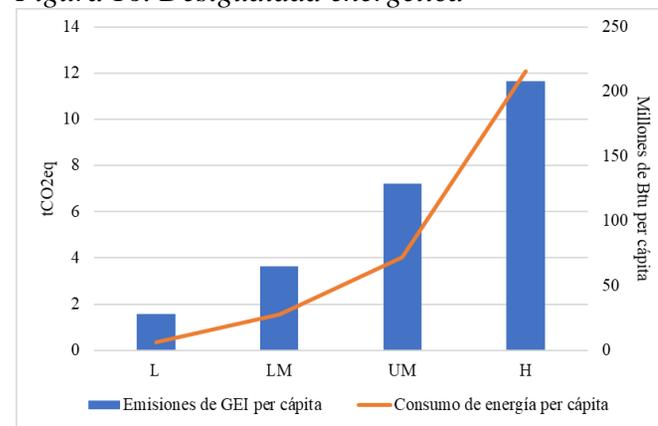
Fuente: Elaboración propia con datos del Banco Mundial.

Figura 15. Emisiones de GEI per cápita y población



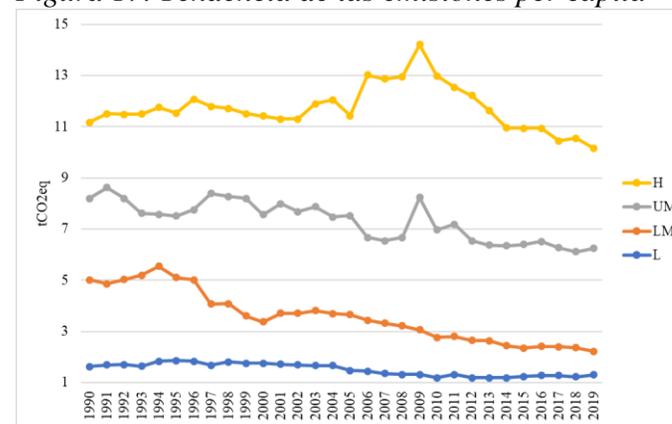
Fuente: Elaboración propia con datos del Banco Mundial.

Figura 16. Desigualdad energética



Fuente: Elaboración propia con datos del Banco Mundial.

Figura 17. Tendencia de las emisiones per cápita



Fuente: Elaboración propia con datos del Banco Mundial.

Por otra parte, al considerar la distribución de la población (Figura 14), destaca que la urbanización es más pronunciada mientras mayor sea el ingreso, y por su parte, al observar el agregado (Figura 15), tenemos que la población guarda una relación inversa respecto al nivel de ingreso, pero las emisiones per cápita guardan una relación directa con respecto a este, es decir, notamos que a pesar de que la población disminuye conforme aumenta el ingreso, las emisiones por individuo aumentan, lo que puede ser consecuencia de una disparidad en cuanto al acceso a la energía que responde al ingreso de los países; se observa un punto de equilibrio en los países de ingreso medio alto (UM).

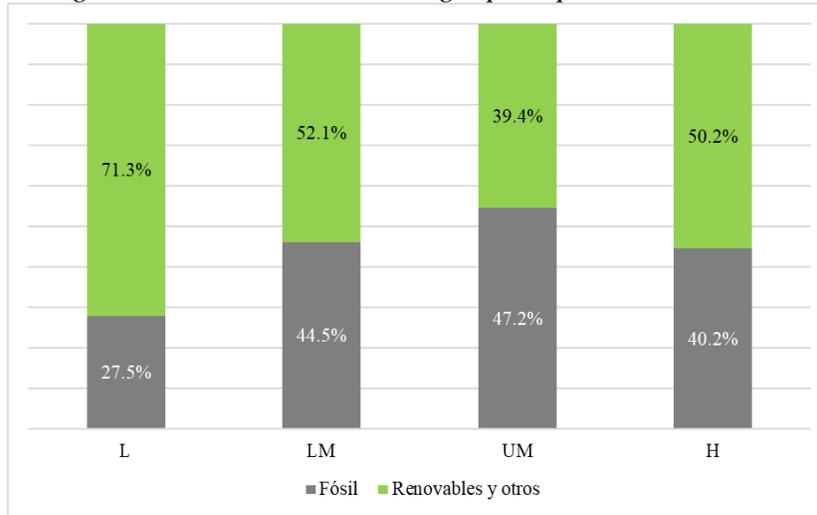
Esta tendencia de disparidad se confirma al identificar que las emisiones de GEI y el consumo per cápita de energía guardan una relación directa (Figura 16), es decir, los datos sugieren la existencia de una desigualdad de consumo energético ligada a la desigualdad por ingreso entre países. A su vez, se identifica una tendencia a la disminución de emisiones de GEI per cápita en el periodo estudiado, para los cuatro niveles de ingreso (Figura 17). La desigualdad que observamos se pronuncia aún mayor al tener en mente que encontramos que los países de mayor ingreso son más eficientes en el consumo energético debido al tipo de tecnología empleada.

Por otro lado, la curva de Kuznets observada con niveles de ingreso y emisiones de GEI, se refleja de manera casi perfecta en la producción energética de combustibles fósiles (Figura 18), y levemente en su consumo (Figura 19).

Por una parte, la participación en la producción de energías de fuentes fósiles, que incluye petróleo y otros líquidos, carbón, y gas natural, indica que en las primeras etapas de crecimiento económico (L, LM, UM) la participación de energéticos fósiles en la producción se incrementa, pero hay un punto de inflexión en la transición hacia un ingreso alto (H), donde estos combustibles pierden contribución hasta reducirse a participaciones menores que en los países de ingreso medio bajo (LM). Por otra parte, el consumo de energías fósiles muestra un comportamiento similar, aunque la curva de Kuznets se observa menos pronunciada.

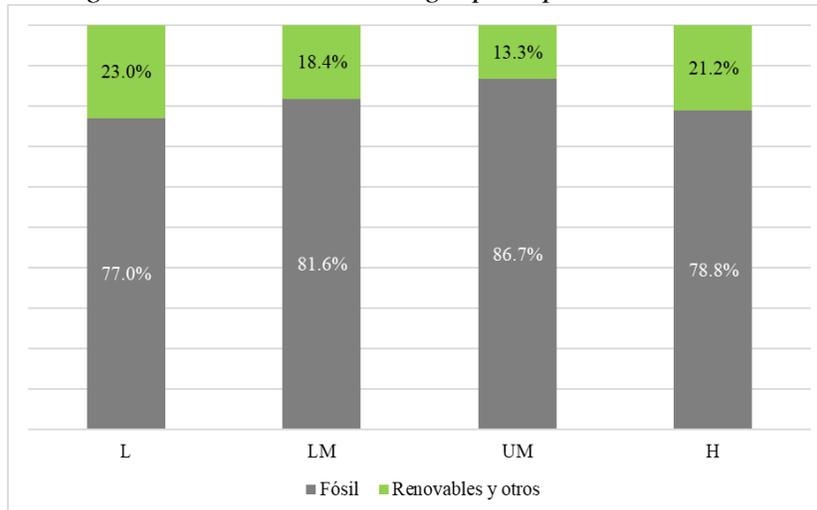
El complemento de la relación entre ingreso y combustibles fósiles, es decir, las energías renovables (y otros tipos), develan que son los países de ingreso bajo (L) los que producen y consumen más energías renovables y de otros tipos.

Figura 18. Producción de energía por tipo de combustible



Fuente: Elaboración propia con datos de la EIA.

Figura 19. Consumo de energía por tipo de combustible



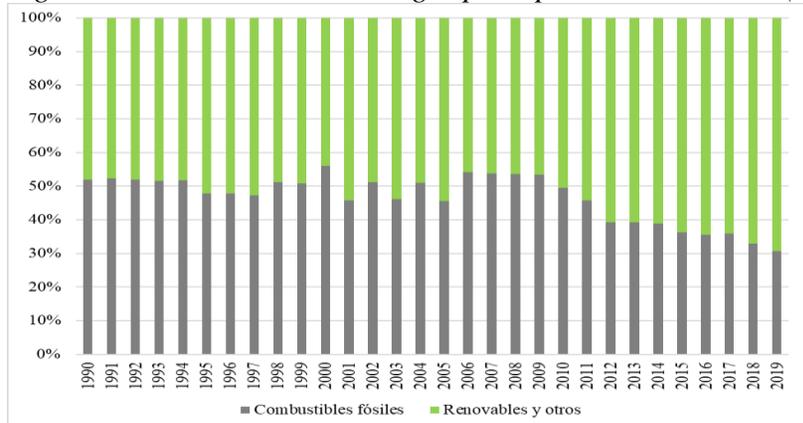
Fuente: Elaboración propia con datos de la EIA.

Al observar el comportamiento histórico de los tipos de energía producidos y su consumo, descubrimos las diferencias en el peso de las energías renovables y fósiles al interior de cada grupo de ingreso, comenzando por el grupo de países de ingresos altos, cuya producción de energías renovables muestra una ligera tendencia a ganar terreno sobre las energías fósiles (Figura 20), aunque el consumo muestra una tendencia igualmente moderada, pero en sentido inverso (Figura 21), no obstante, sabemos que este grupo es el que menos emisiones de GEI emite y el que tiene una eficiencia energética mayor debido al acceso de tecnología, por lo que inferimos que el consumo de fósiles sigue siendo mayor y va en aumento, pero con emisiones reducidas cada año.

Por su parte, la sustitución de energías fósiles se pronuncia sobre todo en el grupo de países de ingreso UM (Figura 22), aunque recordemos que este grupo emite la mayor cantidad de GEI, por lo que si bien su producción está migrando aún lo hace con tecnología menos eficiente que la de los países de ingreso alto. El consumo también muestra esta tendencia, aunque al hablar de un periodo de tres décadas no puede ser considerado significativo (Figura 23), y a su vez, podríamos considerar que está ocurriendo una transferencia de tecnología de los países de ingreso H hacia UM, por ejemplo, mediante inversión en proyectos sustentables. Dicha transferencia tecnológica no se observa en países de ingresos medio bajo y bajo.

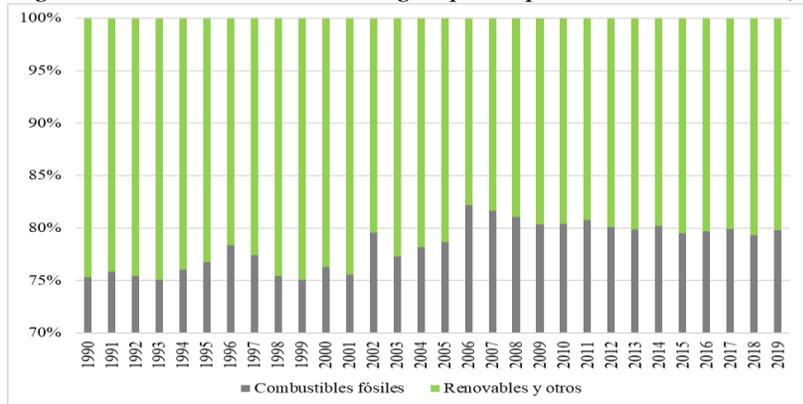
No se observa una migración relevante en el tipo de energéticos que producen y consumen los países de ingreso medio bajo (Figuras 24 y 25). Finalmente, al interior, y en retrospectiva, los países de ingreso bajo han dependido de fuentes de energía alternativa como la hidroelectricidad, lo que puede explicarse por la baja urbanización que observamos anteriormente, lo que se traduce en población que se encuentra asentada cerca de los recursos naturales útiles para este fin, por lo que notamos que su producción de energía de fuentes renovables (y otros) presenta una participación mayor con el paso de los años, aunque el consumo de estos energéticos limpios ha sido estable (Figuras 26 y 27). Además, son los países que, respecto de su consumo total de energía, son los que menos emplean energéticos fósiles en comparación con el resto, pero hemos mencionado que carecen de tecnología que permita la explotación eficiente de estos, por lo que a su bajo consumo corresponde una alta emisión de GEI en comparación al resto de países de la muestra.

Figura 20. Producción de energía por tipo de combustible (H)



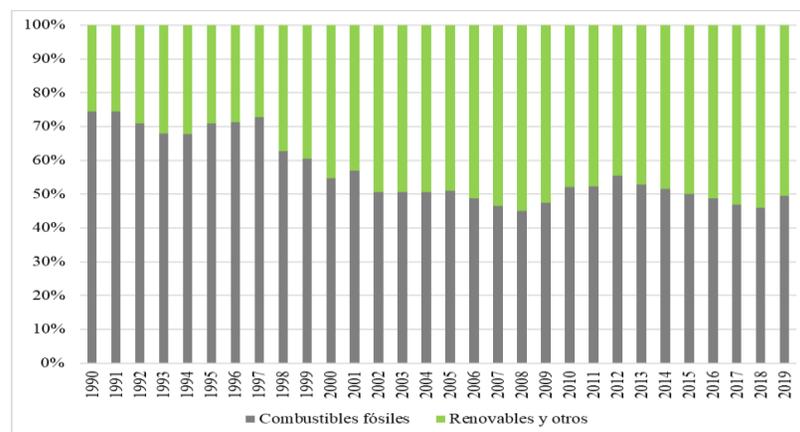
Fuente: Elaboración propia con datos de la EIA.

Figura 21. Consumo de energía por tipo de combustible (H)



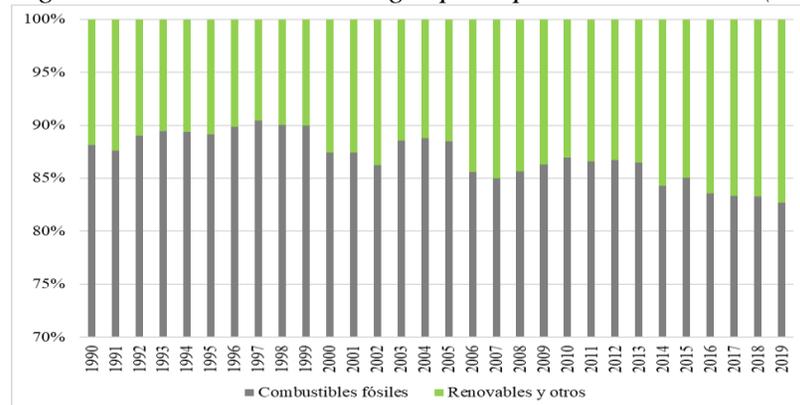
Fuente: Elaboración propia con datos de la EIA.

Figura 22. Producción de energía por tipo de combustible (UM)



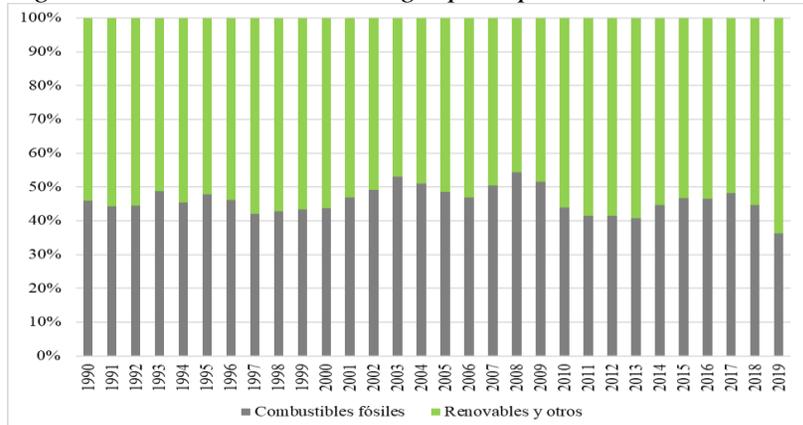
Fuente: Elaboración propia con datos de la EIA.

Figura 23. Consumo de energía por tipo de combustible (UM)



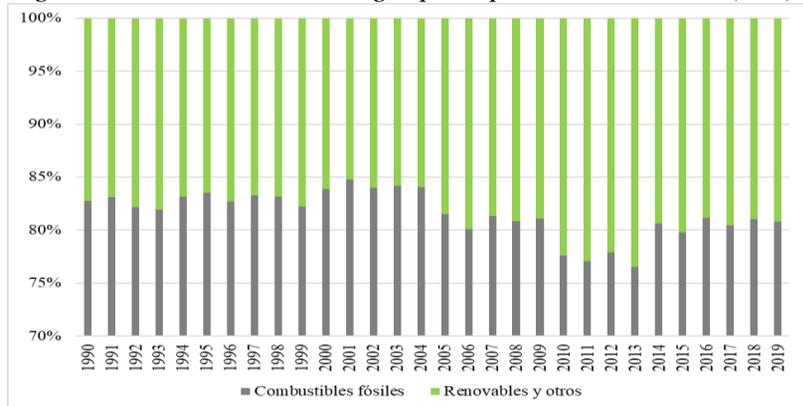
Fuente: Elaboración propia con datos de la EIA

Figura 24. Producción de energía por tipo de combustible (LM)



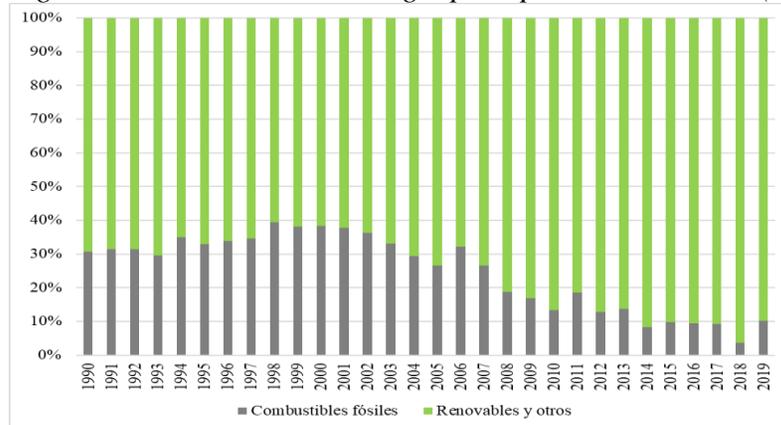
Fuente: Elaboración propia con datos de la EIA.

Figura 25. Consumo de energía por tipo de combustible (LM)



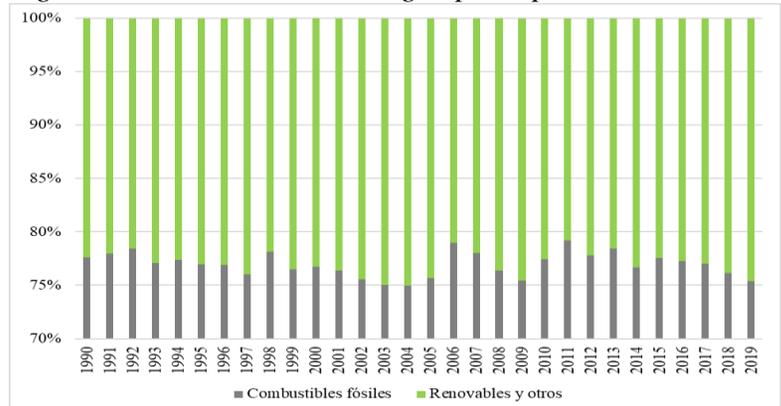
Fuente: Elaboración propia con datos de la EIA.

Figura 26. Producción de energía por tipo de combustible (L)



Fuente: Elaboración propia con datos de la EIA.

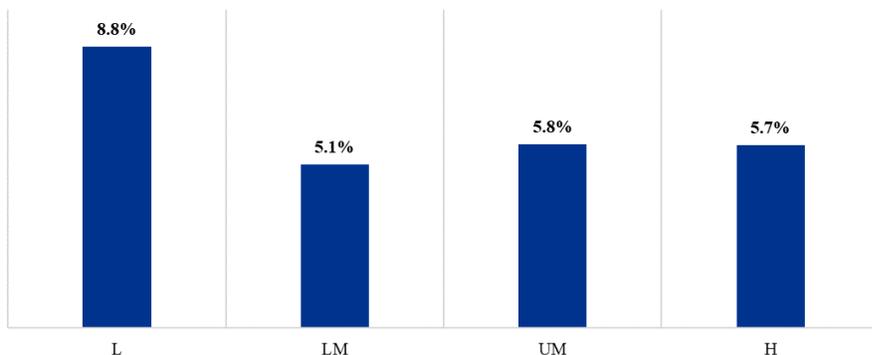
Figura 27. Consumo de energía por tipo de combustible (L)



Fuente: Elaboración propia con datos de la EIA.

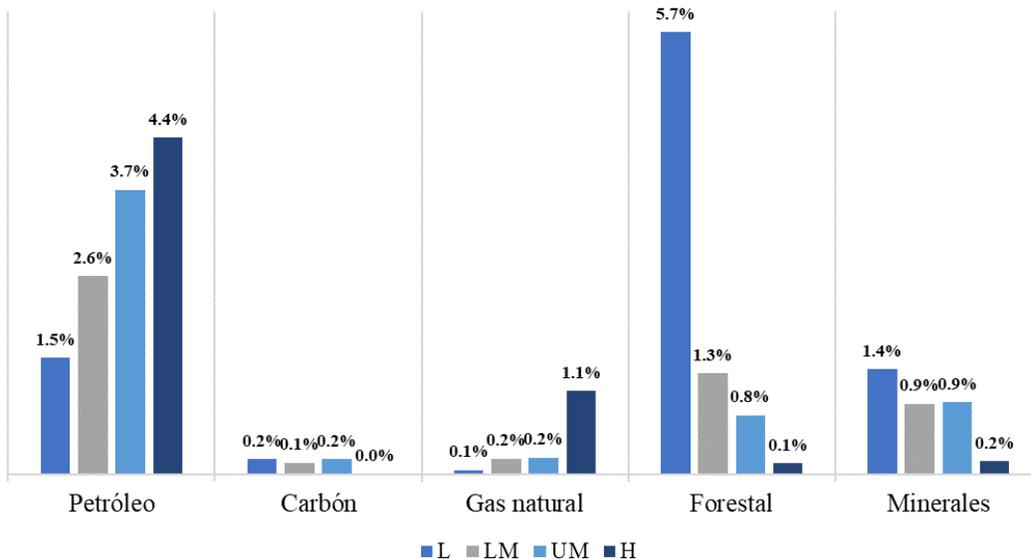
Aunado a lo subrayado sobre la dependencia de los países de menor ingreso sobre energías alternativas como la generación hidroeléctrica, podemos notar que es en estos donde los recursos naturales representan una gran parte del ingreso nacional y sobrepasan por mucho a la participación que este tipo de recursos pesa en los demás grupos de ingreso (Figura 28); en particular destacan las reservas forestales, y por su lado, la ponderación del petróleo en el PIB de los países responde directamente al nivel de ingreso (Figura 29).

Figura 28. Rentabilidad de los recursos naturales (% del PIB)



Fuente: Elaboración propia con datos del Banco Mundial.

Figura 29. Rentabilidad de los recursos naturales por tipo (% del PIB)

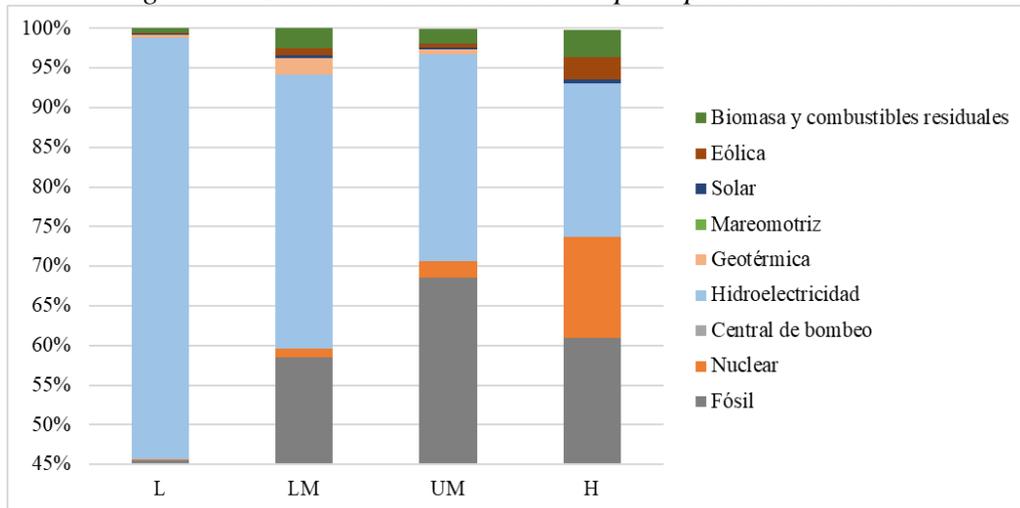


Fuente: Elaboración propia con datos del Banco Mundial.

Recordemos que las energías renovables y otros tipos que no provienen de fuentes fósiles, es decir, energía nuclear, hidroelectricidad, geotérmica, mareomotriz, solar, eólica, biomasa y combustibles residuales, así como la generada por centrales de bombeo, son consumidas mediante su transformación a energía eléctrica, observar el detalle de esta generación nos permite inferir si existe una adopción por energías limpias (Figura 30). En primera instancia, hemos notado que la producción (total) de energía fósil da soporte para confirmar la hipótesis de la CAK, y resulta que al observar el detalle de la generación eléctrica a partir de estos energéticos presenta una relación similar. Del total de electricidad generada, el empleo de

combustibles fósiles (petróleo y otros líquidos, carbón, y gas natural) aumenta sistemáticamente en los grupos de ingreso L, LM, y UM, pero a un nivel de ingreso alto, el uso de estos energéticos disminuye por debajo de la participación que tenía en UM, esto es, se refleja una curva de Kuznets en las participaciones de energía fósil en la generación de energía eléctrica.

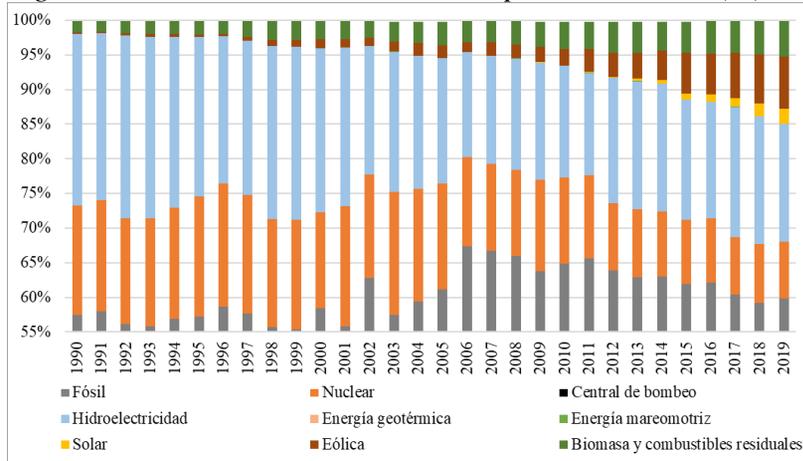
Figura 30. Generación de electricidad por tipo de combustible



Fuente: Elaboración propia con datos de la EIA.

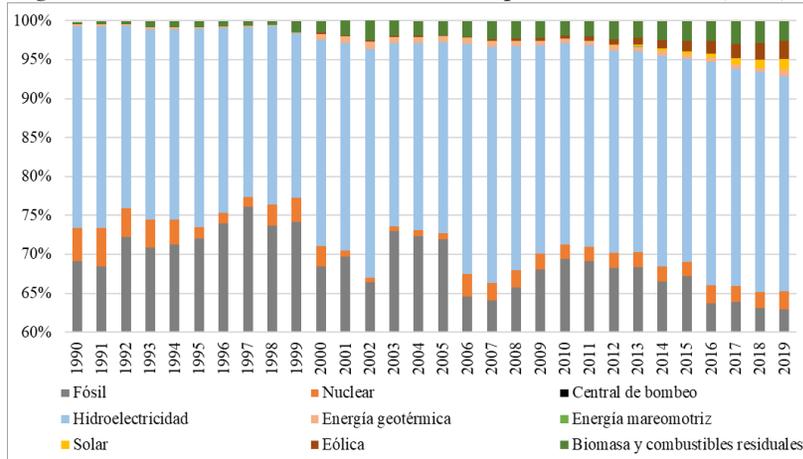
Notemos que los combustibles fósiles siguen representando alrededor de la mitad de la generación de energía eléctrica, teniendo para los países de ingreso bajo una participación de poco más de 45% y para LM, UM y H por arriba de 55%. Al observar, sin embargo, el detalle histórico para cada grupo de ingreso se percibe que las energías limpias empiezan a cobrar relevancia en la producción de electricidad.

Figura 31. Generación de electricidad por combustible (H)



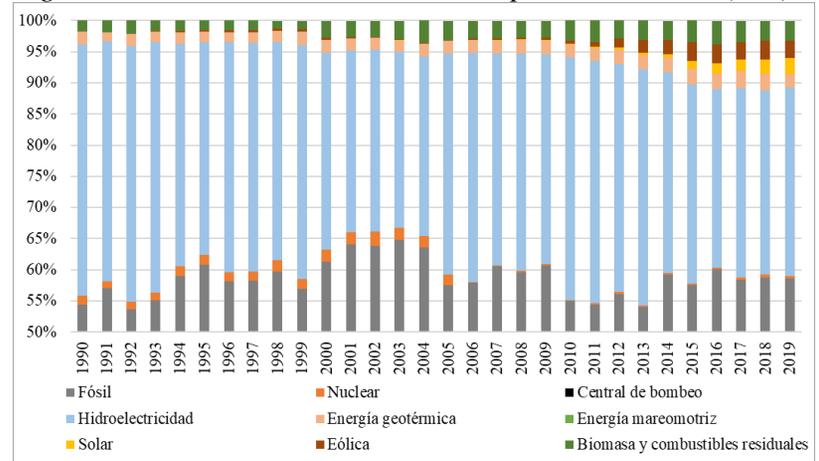
Fuente: Elaboración propia con datos de la EIA.

Figura 32. Generación de electricidad por combustible (UM)



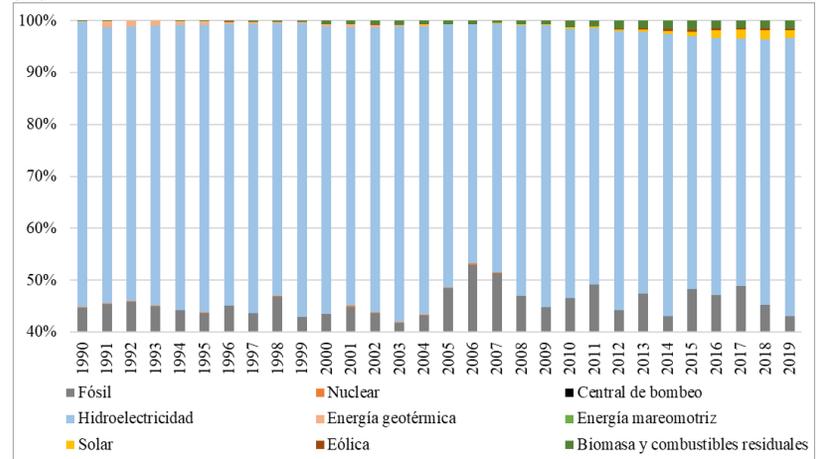
Fuente: Elaboración propia con datos de la EIA.

Figura 33. Generación de electricidad por combustible (LM)



Fuente: Elaboración propia con datos de la EIA.

Figura 34. Generación de electricidad por tipo de combustible (L)



Fuente: Elaboración propia con datos de la EIA.

En primera instancia identificamos que en los países de ingreso alto se presenta una tendencia hacia la sustitución de energías limpias a partir de 2005 (Figuras 31), este patrón viene acompañado del uso de energías como la eólica y solar. La tendencia es menos marcada conforme disminuye el ingreso, aunque todavía se identifica el patrón ligeramente en los países de ingreso medio alto (Figura 32), esta vez, incluyendo energía geotérmica.

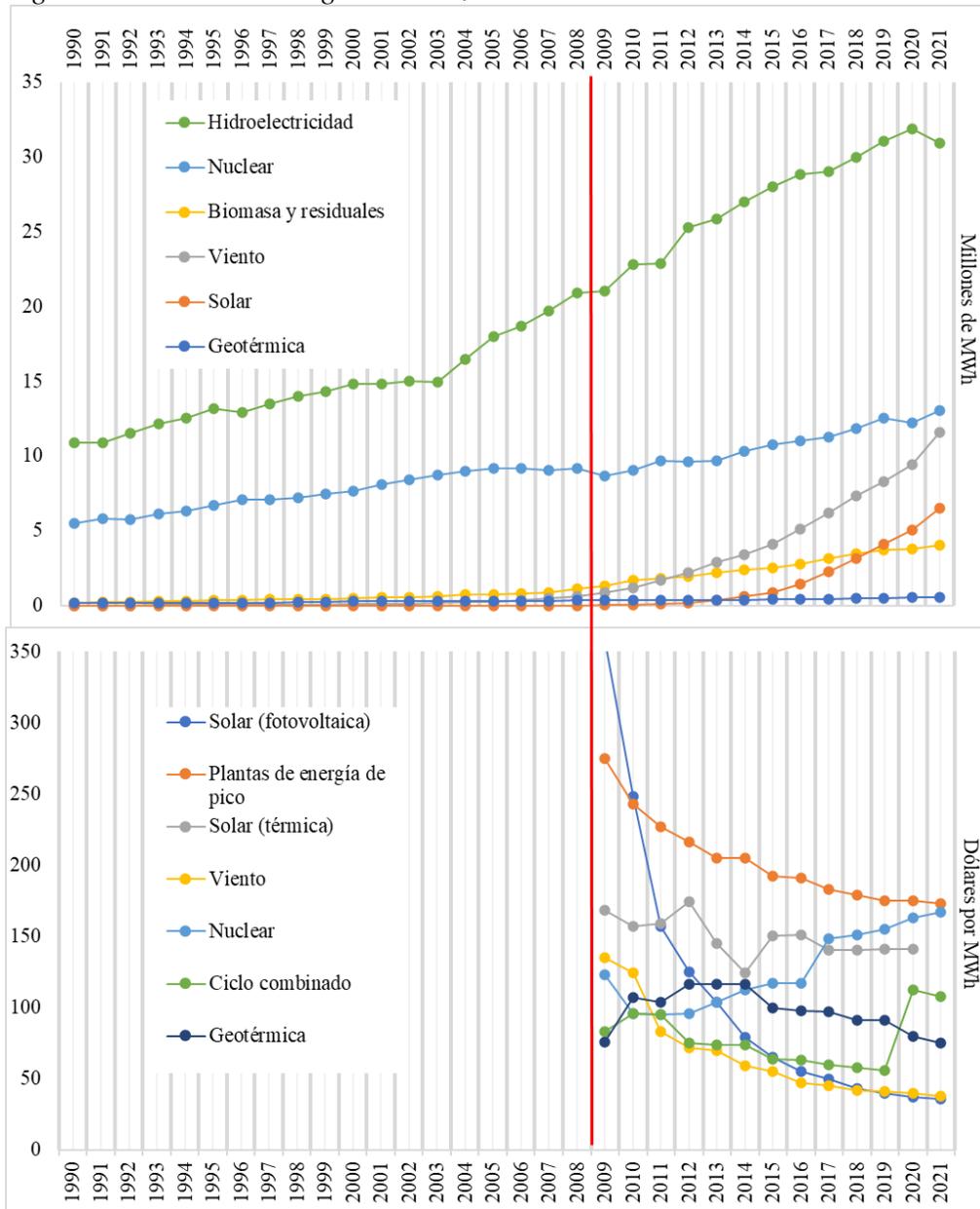
En contraste, no se observa una tendencia acentuada en los países de ingreso medio bajo, aunque aún se percibe el empleo de energías limpias (Figura 33), las cuales, como hemos planteado, pueden derivarse de inversión extranjera proveniente de países de ingreso alto, lo que conlleva una transferencia de tecnología que comienza a percibirse después de la primera década del periodo estudiado. Por su parte, en los países de ingreso bajo (Figura 34) las energías limpias apenas tienen una participación marginal, y como mencionamos, domina el uso de hidroelectricidad, lo que responde a la estructura demográfica de estos países (baja urbanización).

Estos datos presentan un argumento en favor de una *curva tecnológica de Kuznets*, que podríamos describir como la sustitución de energías limpias que responde al incremento en el ingreso, pues el desarrollo tecnológico implica costos que los países de ingreso bajo no pueden cubrir, por lo que dependen de energías alternativas que requieren tecnología obsoleta, mientras que los países de ingreso mayor cuentan con la estructura económica para emplear tecnología que eficientiza el consumo y la producción, obteniendo mayores rendimientos y menores emisiones de GEI.

Esta curva tecnológica encuentra soporte adicional cuando observamos los datos disponibles de los costos de la energía limpia. Al observar la figura 35, es claro que a partir del 2008 ocurre una caída pronunciada en el precio de las energías limpias (ver Lazard, 2021), acompañado del incremento de la generación de electricidad a partir de estas. Este evento coincide cronológicamente con la crisis económica financiera del mismo año, y a la par, con la crisis energética que se venía gestando desde el inicio de los años 2000 (ver Ταγκίρης & Tagkiris, 2022) y que tuvo mayores implicaciones en las fluctuaciones importantes en los precios del petróleo alrededor de 2014 (ver Prest, 2018), a lo que el mercado podría responder por *efecto sustitución* a la caída de los precios de las energías limpias.

Este reajuste lo observamos para la muestra de 86 países, pero tomando los datos de generación de electricidad por tipo de combustible hacia 2021, con lo que la curva tecnológica de Kuznets planteada puede ser percibida para un periodo de 13 años. Una explicación que coincide con nuestro análisis hasta ahora es que el precio de la tecnología disminuye ligado al incremento en el ingreso, pues se cuenta con condiciones para la inversión en investigación y desarrollo.

Figura 35. Curva tecnológica de Kuznets

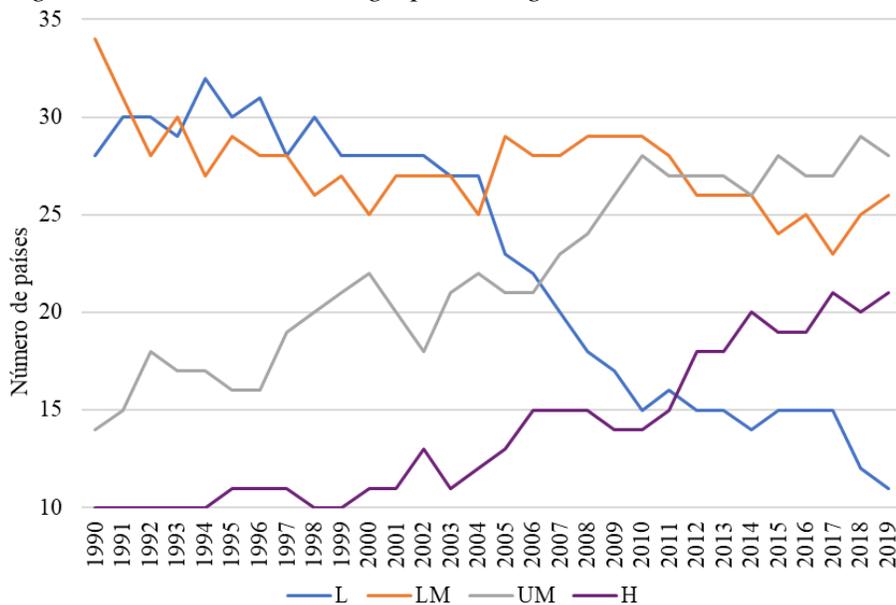


Fuente: Elaboración propia con datos de la EIA y Lazard.

Aunado a los argumentos anteriores que permiten identificar una curva tecnológica de Kuznets, retomamos la clasificación de países por grupos de ingreso, que hasta ahora ha sido el dato subyacente en nuestras observaciones. Como explicamos en su descripción, dicha clasificación evoluciona con el tiempo, por lo que algunos países presentan, en ciertos años, cambios en su grupo de ingreso. En la figura 36 se presenta el cambio de grupos de ingreso en las tres décadas de estudio; es claro que ocurrió un reajuste en las condiciones económicas internacionales a partir de 2004, cuando un número significativo de países de la muestra pasó del nivel de ingreso bajo hacia grupos de ingresos mayores. Esto da cuenta que del mejoramiento en el ingreso se deriva la capacidad en inversión y/o adopción de tecnología que a su vez permite el

reajuste del sistema energético de los países, contribuyendo a que los objetivos internacionales de reducción de emisiones de GEI planteados en el Protocolo de Kyoto, y posteriormente, en el Acuerdo de Paris puedan ser conseguidos.

Figura 36. Evolución de los grupos de ingreso



Fuente: Elaboración propia con datos del Banco Mundial.

En línea con la curva tecnológica de Kuznets y el ajuste en las condiciones económicas internacionales, podemos presenciar el fenómeno de *desacoplamiento* de emisiones de GEI y crecimiento económico. La figura 37 muestra que el desacoplamiento a nivel internacional se confirma en el año 2013, cuando el crecimiento económico, aunque menor el año precedente, fue positivo, mientras las emisiones de GEI presentaron una caída. Este descubrimiento coincide con el desacoplamiento que la IEA anunció para el año 2014, respecto de las emisiones de CO2 y crecimiento del PIB global (ver IEA, 2016).

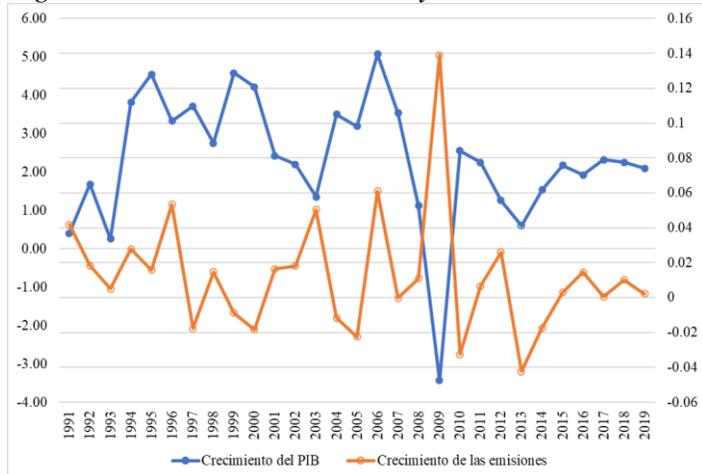
Figura 37. Desacoplamiento



Fuente: Elaboración propia con datos del Banco Mundial.

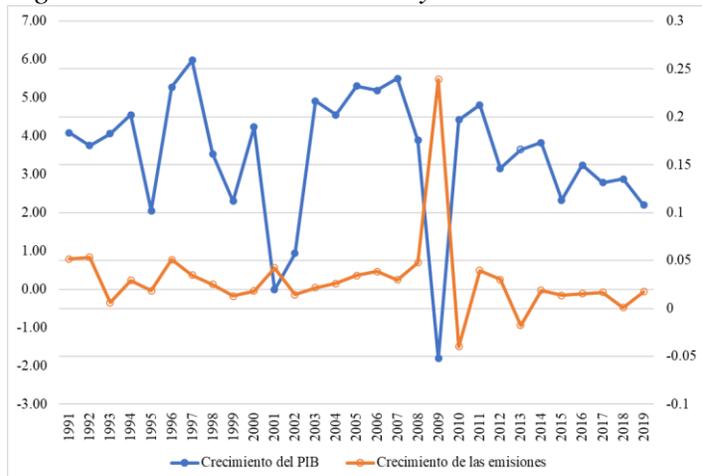
El crecimiento del PIB y las emisiones de GEI para cada grupo de ingreso se presenta en las figuras 38, 39, 40, y 41, encontrándose que, a nivel internacional, y para los grupos de ingreso alto, y medio alto, se observa el ajuste del desacoplamiento a partir del año 2008, coincidiendo con la curva tecnológica de Kuznets observada. Por su parte, el desacoplamiento para los países de ingreso medio bajo y bajo se presenta en periodos distintos, lo que puede responder a las variables analizadas hasta ahora, esto es, puede responder a la eficiencia de las emisiones, acceso a la tecnología, urbanización, o a la migración de países hacia niveles de ingreso mayores.

Figura 38. Crecimiento del PIB y de emisiones de GEI (H)



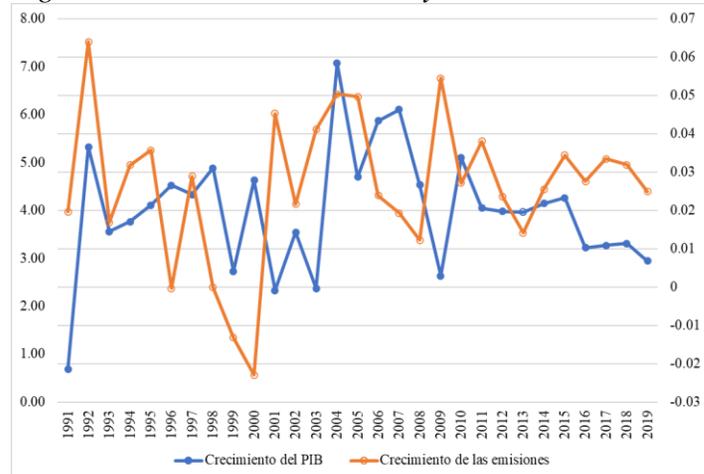
Fuente: Elaboración propia con datos del Banco Mundial.

Figura 39. Crecimiento del PIB y de emisiones de GEI (UM)



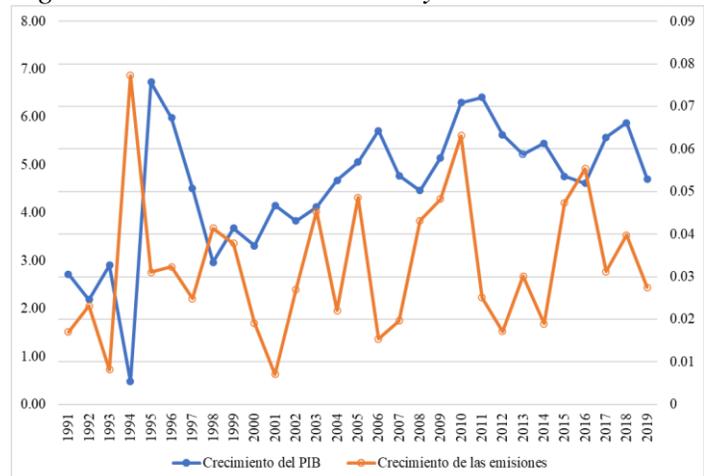
Fuente: Elaboración propia con datos del Banco Mundial.

Figura 40. Crecimiento del PIB y de emisiones de GEI (LM)



Fuente: Elaboración propia con datos del Banco Mundial.

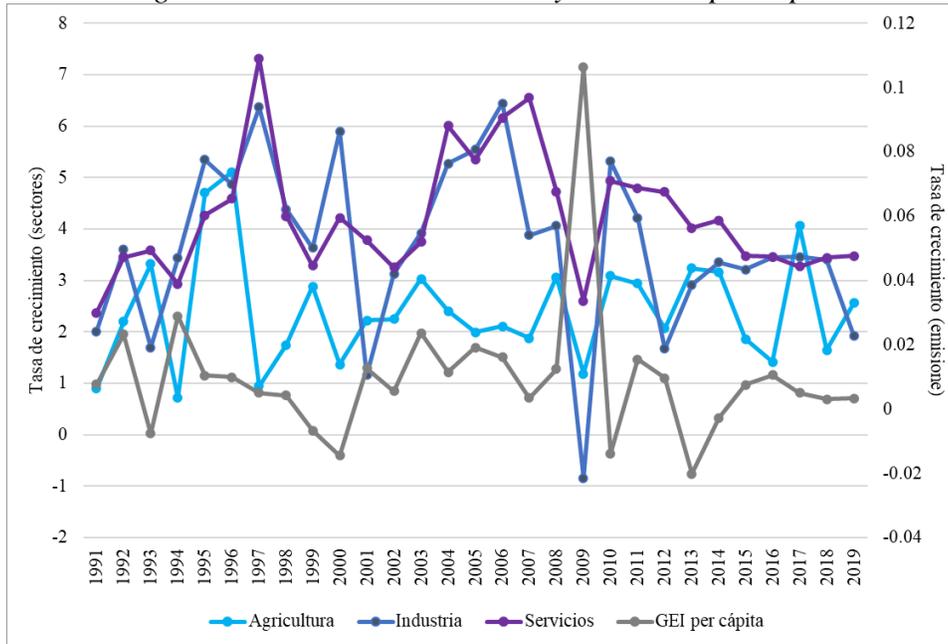
Figura 41. Crecimiento del PIB y de emisiones de GEI (L)



Fuente: Elaboración propia con datos del Banco Mundial.

Finalmente, el desacoplamiento se proyecta también en la estructura de mercado; en la figura 42 se muestra que el patrón de desacoplamiento se repite, si comparamos el crecimiento de las emisiones per cápita contra el crecimiento de los sectores, en particular, notamos que el reajuste ocurre como anteriormente, a partir de 2008. En general observamos que, a nivel internacional, la industria y los servicios han tenido un mejor desempeño que las actividades agrícolas.

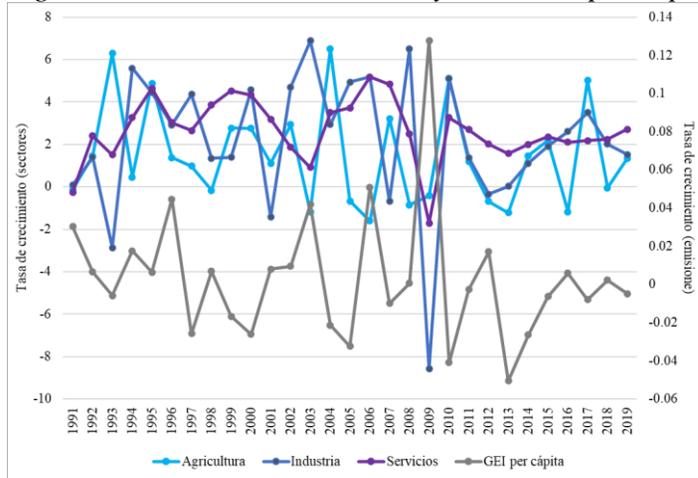
Figura 42. Crecimiento sectorial y emisiones per cápita



Fuente: Elaboración propia con datos del Banco Mundial.

Tal como lo descrito a nivel agregado, el desacoplamiento se pronuncia sobre todo en países de ingreso alto, y medio alto, y se atenúa a menor sea el ingreso de los países, donde el crecimiento sectorial se percibe bastante ligado todavía al crecimiento de las emisiones de GEI per cápita (figuras 43, 44, 45 y 46). Esta observación contribuye al argumento de que efectivamente presenciamos una curva ambiental de Kuznets que responde al ingreso de los países.

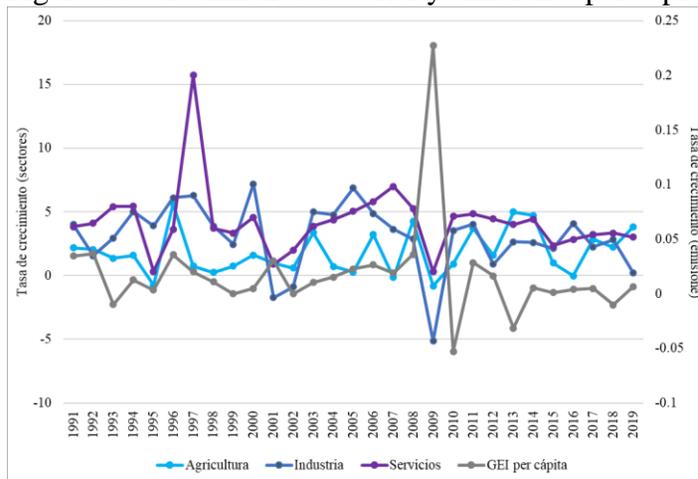
Figura 43. Crecimiento sectorial y emisiones per cápita (H)



Fuente:

Elaboración propia con datos del Banco Mundial.

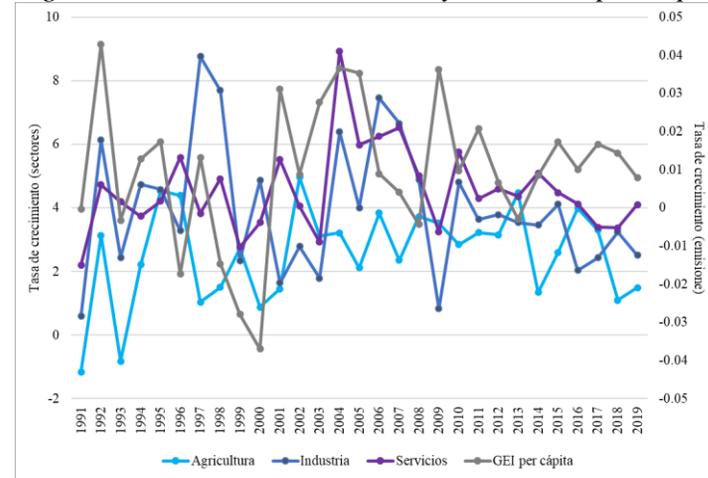
Figura 44. Crecimiento sectorial y emisiones per cápita (UM)



Fuente:

Elaboración propia con datos del Banco Mundial.

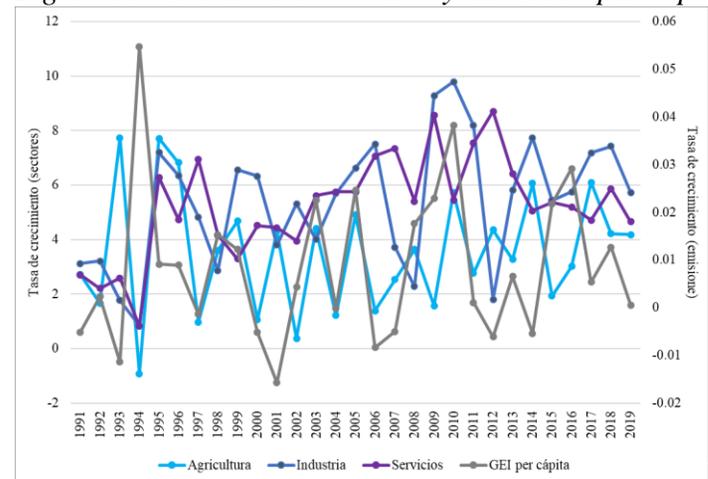
Figura 45. Crecimiento sectorial y emisiones per cápita (LM)



Fuente:

Elaboración propia con datos del Banco Mundial.

Figura 46. Crecimiento sectorial y emisiones per cápita (L)



Fuente:

Elaboración propia con datos del Banco Mundial.

6. Especificación econométrica der la curva inversa de Kuznets

La estrategia empírica para probar los hallazgos observados en el análisis exploratorio es el empleo de un estimador de regresión cuantílica para datos de panel (QRPD) con efectos fijos no aditivos, desarrollado por Powell (2022). Este modelo es un caso especial del modelo general de regresión cuantílica (GQR) como lo describe el autor (2020), y resuelve un problema presente en otros estimadores cuantílicos de efectos fijos.

El uso de este modelo es reciente adopción y de acuerdo con nuestra revisión de la literatura, no ha sido empleado para medir el impacto de las emisiones de GEI en crecimiento económico con la extensión temporal y tamaño de la muestra similares al nuestro; sin embargo, debemos reconocer el trabajo de Sarkodie y Strezov (2019), pues emplearon el mismo modelo, pero analizaron (únicamente) los 5 mayores emisores de GEI, con lo que confirmaron la CAK para estos países.

Asimismo, debemos mencionar los trabajos de Sharma (2022), quien investigó los efectos de la emisión de GEI en el turismo internacional; Jiang et al. (2019), quienes midieron el impacto del transporte público en emisiones de carbono, y de Liu et al. (2019), que observaron el efecto de la desigualdad de ingreso en Estados Unidos respecto de la emisión de carbono; todos ellos utilizando nuestro modelo de elección.

El modelo QRPD se define como:

$$Y_{it} = D'_{it}\beta(U_{it}^*) \quad (1)$$

Donde D es la matriz de variables de tratamiento (el índice i representa los países y t los años), β es el coeficiente por estimar para el τ -percentil específico $\tau \in (0,1)$; $U_{it}^* \sim U(0,1)$, $U_{it}^* = f(U_{it}, \alpha_i)$ siendo α_i el efecto fijo y f no es conocida. U_{it}^* actúa como una variable de rango y representa la propensión del resultado.

La función cuantílica está dada por:

$$Q_{y_{it}}(\tau|d) = d'_{it}\beta(\tau) \quad (2)$$

Donde d es la variable en cuestión. La función Q_y define el cuantíl del resultado para la variable $Y_d = d'_{it}\beta(U^{*d})$ para una d fija y una función $U^* \sim U(0,1)$ seleccionada aleatoriamente.

Como advierte Powell (2022), debido a que la estimación y cálculo de errores estándar suele representar un reto número cuando se trabaja con más de dos variables de tratamiento resulta preciso optimizar con métodos como métodos de Montecarlo basados en cadenas de Markov, por lo que de este modo es que procedemos.

Dado que contamos con un panel balanceado de 86 países y 30 años de observaciones, trabajaremos con tasas de crecimiento con el fin de homologar las unidades y simplificar la interpretación de resultados. Por su parte, en algunos países y en ciertos años las energías renovables no tuvieron participación en la producción o el consumo de energía, por lo que no es posible contar con la tasa de crecimiento para el panel balanceado, con lo que optamos trabajar con dicha participación como unidad de porcentaje, es decir, no como crecimiento.

Asimismo, notamos que el dato para el crecimiento de la producción de energía no constituía un panel balanceado, debido a que 10 países de la muestra presentaban valores de producción energética nulos para ciertos años, debido al tipo de economía que constituyen (ver Anexo I), por lo que los removimos de la misma buscando obtener estimadores consistentes. Por otra parte, el dato de energías renovables no es una tasa de crecimiento como explicamos arriba, y resulta que el dato presenta problema de raíz unitaria, sin embargo, al obtener primeras diferencias, la variable continúa presentando el error, por lo que decidimos removerla del modelo. Luego, para incluir la información sobre la rentabilidad de los recursos naturales, removimos dos países de la muestra, pues no contamos con el dato de al menos una observación.

Con lo anterior, la muestra sobre la que estimaremos el modelo se constituye de 74 países y 29 años de observaciones (Anexo I), repartidos en los 4 niveles de ingresos descritos arriba.

Partimos, pues, descartando problemas de raíz unitaria en las variables mediante la prueba de Levin–Lin–Chu para datos de panel (ver Levin et al., 2002). En la tabla 7 presentamos la prueba para las variables de elección

Tabla 7. Prueba de Levin–Lin–Chu

Variable	Estadístico	Valor p
gdp_r	-13.8206	0.0000
ghg_r	-18.2782	0.0000
ghg_r_sqrt	-16.3702	0.0000
pop_r	-15.2536	0.0000
urban_r	-9.2872	0.0000
rural_r	-10.2429	0.0000
services_r	-13.8960	0.0000

agro_r	-22.0548	0.0000
industry_r	-15.2569	0.0000
energy_cons_r	-17.9429	0.0000
renewables_prod_share	-1.3e+05	0.0000
natural_rents	-5.6870	0.0000

Fuente: Elaboración mediante software Stata.

Tomando las variables de elección, verificamos que no existe correlación serial en el panel mediante la prueba de Wooldridge (2002), es decir, no hay autocorrelación de primer orden en los datos. Asimismo, la tabla 8 muestra las correlaciones y los niveles de significancia para cada variable, vemos que algunos de ellos no son significativos.

Tabla 8. Matriz de correlación

Variables	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
(1) gdp_r	1.000												
(2) ghg_r	0.132 (0.000)	1.000											
(3) ghg_r_sqrt	-0.032 (0.133)	0.690 (0.000)	1.000										
(4) pop_r	0.185 (0.000)	0.076 (0.000)	-0.008 (0.704)	1.000									
(5) urban_r	0.213 (0.000)	0.077 (0.000)	-0.003 (0.884)	0.738 (0.000)	1.000								
(6) rural_r	0.117 (0.000)	0.052 (0.017)	-0.005 (0.812)	0.659 (0.000)	0.348 (0.000)	1.000							
(7) services_r	0.574 (0.000)	0.043 (0.046)	-0.023 (0.290)	0.119 (0.000)	0.130 (0.000)	0.060 (0.006)	1.000						
(8) agro_r	0.368 (0.000)	0.056 (0.009)	0.032 (0.133)	0.118 (0.000)	0.105 (0.000)	0.077 (0.000)	0.115 (0.000)	1.000					
(9) industry_r	0.723 (0.000)	0.127 (0.000)	-0.029 (0.177)	0.149 (0.000)	0.185 (0.000)	0.127 (0.000)	0.306 (0.000)	0.060 (0.006)	1.000				
(10) energy_cons_r	0.190 (0.000)	0.167 (0.000)	0.037 (0.084)	0.117 (0.000)	0.113 (0.000)	0.107 (0.000)	0.098 (0.000)	0.024 (0.263)	0.243 (0.000)	1.000			
(11) energy_prod_r	0.084 (0.000)	0.010 (0.632)	-0.001 (0.949)	0.028 (0.188)	0.031 (0.151)	0.018 (0.411)	0.047 (0.031)	-0.034 (0.118)	0.121 (0.000)	0.000 (0.990)	1.000		
(12) renewables_prod_share	0.046 (0.034)	-0.006 (0.794)	-0.010 (0.634)	-0.067 (0.002)	0.026 (0.222)	0.088 (0.000)	0.029 (0.177)	0.008 (0.717)	0.067 (0.002)	0.028 (0.200)	-0.021 (0.322)	1.000	
(13) natural_rents	0.012 (0.589)	0.034 (0.112)	-0.014 (0.512)	0.364 (0.000)	0.263 (0.000)	0.257 (0.000)	0.029 (0.184)	0.032 (0.137)	0.001 (0.964)	0.058 (0.007)	0.046 (0.032)	-0.289 (0.000)	1.000

Fuente: Elaboración mediante software Stata.

Por último, presentamos el resultado de la estimación para los cuatro cuartiles en las tablas 9, 10, 11, y 12.

Notemos, primero, que el crecimiento de la emisión de GEI presenta un estimador positivo en los cuatro cuartiles. Sin embargo, el mismo desciende hacia los primeros tres, pero al considerar la muestra completa —en el último cuartil— el dato presenta un coeficiente muy por encima de los anteriores. Esto implica que, en el lapso de las tres décadas de estudio, la emisión de GEI ha constituido un factor importante para el crecimiento de los países. Sin embargo, en el largo plazo, al observar los estimadores negativos del crecimiento cuadrático de la emisión de carbono equivalente, tenemos que se confirma la CAK que observamos en el análisis exploratorio, esto es, a nivel internacional, esperaríamos que la contribución de las emisiones de GEI al crecimiento económico sea negativa, en parte, por el costo que implicaría la sobre explotación de las reservas de combustibles fósiles a pesar de la alta eficiencia que pudiera tener derivado del desarrollo tecnológico, es decir, no compensaría una baja intensidad de carbono contra el costo de las emisiones, lo que a su vez deberá incentivar la migración hacia energías limpias; este efecto sustitución se confirma al destacar que la participación de las energías renovables en la producción energética presenta un estimador negativo en los primeros dos cuantiles, mientras que en el tercero el impacto en el crecimiento pasa a ser positivo; aunque debemos aclarar que en el último cuartil este estimador no es estadísticamente significativo.

Por su parte, la población en su totalidad es consistente en ser un factor que explica el crecimiento económico, aunque la población rural se mantiene en valores negativos en los cuatro cuartiles. Sin embargo, la urbanización, que presenta un estimador negativo en los cuartiles 1, 2 y 4, es positiva en el tercer cuartil.

El sector energético presenta resultados que no denotan una tendencia fija, pues el consumo energético fluctúa de un estimador positivo en el primer cuartil, a negativo en el segundo, para volver a ser positivo en el tercero y dejar de ser estadísticamente significativo en el cuarto. La producción del sector varía de manera análoga, aunque siendo significativa en toda la muestra.

También, debemos destacar que el incremento en la participación de los recursos naturales en el producto económico afecta negativamente a este en tres de los cuantiles, y en el otro, es positivo pero apenas marginal. Esto da cuenta de que el estado de explotación de los recursos naturales implica un costo relevante para la economía, por lo que eficientizar su aprovechamiento se traduce como un incentivo económico.

Finalmente, la estructura del mercado es un descriptor fiel del crecimiento económico, siendo que los tres sectores más grandes de la economía presentan estimadores positivos y consistentes a través de las regresiones por cuartiles; se confirma el efecto que habíamos identificado en el análisis exploratorio, los servicios lideran la contribución a la economía, aunque esta disminuye al cuarto cuartil. Seguido de la industria, que *pesa* más en el último cuartil, y por último el sector agrícola. Este aparejamiento sectorial y del PIB nos permite confirmar que el desacoplamiento de las emisiones de GEI y crecimiento económico se materializa en el largo plazo, pues obtuvimos que las emisiones de CO₂eq presentan una contribución significativa en la economía en el periodo estudiado, pero el estimador cuadrático

indica que se confirma la hipótesis de la CAK que hemos descrito a lo largo de la presente investigación; recordemos que nuestro estudio analiza 30 años y el desacoplamiento se comenzó a percibir en la tercera década del estudio. La adopción de tecnologías que mejoren los procesos productivos de energía y que, a su vez, permitan el cumplimiento de los objetivos internacionales de reducciones de GEI es un reto que los países apenas empiezan a resolver; conforme se reduzcan los precios de las energías limpias, derivado del cambio tecnológico, esperaríamos observar una tendencia más pronunciada de desacoplamiento.

Tabla 9. QRPD (0.25) (74)

gdp_r	Coefficiente	Std. err.	z	P>z	[95% int. Conf.]	
ghg_r	2.982	0.058	51.610	0.000	2.869	3.095
ghg_r_sqrt	-2.021	0.029	-70.690	0.000	-2.077	-1.965
pop_r	0.059	0.009	6.370	0.000	0.041	0.077
urban_r	-0.035	0.003	-13.380	0.000	-0.040	-0.030
rural_r	-0.081	0.006	-14.270	0.000	-0.092	-0.070
services_r	0.443	0.001	767.280	0.000	0.442	0.444
agro_r	0.118	0.001	97.170	0.000	0.115	0.120
industry_r	0.313	0.001	269.140	0.000	0.311	0.316
energy_cons_r	0.230	0.057	4.000	0.000	0.117	0.342
energy_prod_r	0.002	0.000	6.520	0.000	0.001	0.003
renewables_prod_share	-0.182	0.010	-17.690	0.000	-0.203	-0.162
natural_rents	-0.035	0.001	-59.530	0.000	-0.036	-0.034

Fuente: Elaboración mediante software Stata.

Tabla 10. QRPD (0.5) (74)

gdp_r	Coefficiente	Std. err.	z	P>z	[95% int. Conf.]	
ghg_r	1.929	0.086	22.390	0.000	1.760	2.098
ghg_r_sqrt	-1.270	0.060	-21.290	0.000	-1.387	-1.153
pop_r	0.080	0.013	6.320	0.000	0.055	0.104
urban_r	-0.046	0.008	-6.150	0.000	-0.061	-0.032
rural_r	-0.072	0.005	-14.520	0.000	-0.081	-0.062
services_r	0.460	0.001	756.870	0.000	0.459	0.461
agro_r	0.115	0.001	103.190	0.000	0.112	0.117
industry_r	0.323	0.002	139.000	0.000	0.318	0.327
energy_cons_r	-0.256	0.119	-2.150	0.032	-0.489	-0.023
energy_prod_r	-0.010	0.001	-11.370	0.000	-0.012	-0.009
renewables_prod_share	-0.086	0.015	-5.810	0.000	-0.115	-0.057
natural_rents	-0.008	0.001	-14.150	0.000	-0.009	-0.007

Fuente: Elaboración mediante software Stata.

Tabla 11. QRPD (0.75) (74)

gdp_r	Coefficiente	Std. err.	z	P>z	[95% int. Conf.]	
ghg_r	1.684	0.045	37.100	0.000	1.595	1.772
ghg_r_sqrt	-0.911	0.023	-38.840	0.000	-0.957	-0.865
pop_r	0.017	0.007	2.550	0.011	0.004	0.031
urban_r	0.045	0.003	15.640	0.000	0.039	0.050
rural_r	-0.056	0.003	-17.330	0.000	-0.062	-0.050
services_r	0.441	0.001	848.740	0.000	0.440	0.442
agro_r	0.113	0.000	284.660	0.000	0.113	0.114
industry_r	0.306	0.000	623.360	0.000	0.305	0.307
energy_cons_r	0.091	0.029	3.090	0.002	0.033	0.149
energy_prod_r	-0.010	0.000	-37.150	0.000	-0.011	-0.010
renewables_prod_share	0.057	0.008	7.090	0.000	0.041	0.072
natural_rents	0.003	0.001	2.590	0.010	0.001	0.005

Fuente: Elaboración mediante software Stata.

Tabla 12. QRPD (1.0) (74)

gdp_r	Coefficiente	Std. err.	z	P>z	[95% int. Conf.]	
ghg_r	9.519	0.217	43.810	0.000	9.093	9.944
ghg_r_sqrt	-10.205	0.104	-97.840	0.000	-10.410	-10.001
pop_r	1.777	0.016	110.230	0.000	1.745	1.808
urban_r	-0.912	0.008	-121.180	0.000	-0.927	-0.898
rural_r	-0.337	0.013	-26.110	0.000	-0.362	-0.312
services_r	0.097	0.014	6.980	0.000	0.070	0.124
agro_r	0.175	0.003	68.290	0.000	0.170	0.180
industry_r	0.245	0.003	70.510	0.000	0.238	0.252
energy_cons_r	0.181	0.244	0.740	0.457	-0.296	0.659
energy_prod_r	0.106	0.003	38.380	0.000	0.101	0.112
renewables_prod_share	0.008	0.033	0.230	0.816	-0.056	0.072
natural_rents	-0.106	0.001	-79.560	0.000	-0.109	-0.104

Fuente: Elaboración mediante software Stata.

7. Conclusiones

Esta investigación, de acuerdo con nuestra revisión de la literatura, es la primera en emplear un modelo de datos de panel cuantílico con efectos fijos no aditivos, con una temporalidad y tamaño de la muestra como la nuestra, para analizar el impacto de las emisiones de GEI y crecimiento económico. Por otra parte, la literatura se ha enfocado en estudiar las emisiones de CO₂ y su impacto en el PIB; en el presente estudio planteamos la situación de forma inversa, es decir, entender el impacto que tienen las emisiones de GEI en el crecimiento económico, incluyendo, además de CO₂, el resto de los gases de efecto invernadero considerados en las metas de reducción del Protocolo de Kyoto, con lo que contribuimos al entendimiento del fenómeno presente en esta relación de emisiones y producto.

En primera instancia, se verifica la hipótesis de la investigación tanto a nivel descriptivo como econométrico: una relación inversa entre crecimiento económico y emisiones de GEI. Se devela una curva ambiental de Kuznets, al observar que las emisiones de GEI se incrementan a mayores niveles de ingreso de los países, pero alcanzan un punto de inflexión, de modo que los países de ingreso alto son los que emiten menores emisiones de CO₂eq. Asimismo, el modelo estimado revela que las emisiones de GEI contribuyen de manera positiva en el crecimiento económico, pero en el largo plazo, al considerar la variable cuadrática, se alcanza un punto de inflexión con lo que las emisiones presentan un estimador negativo, derivado —en parte— del costo implícito en la sobre explotación de los combustibles fósiles.

Al ofrecer una explicación de la relación observada, verificamos que el consumo de la energía sigue siendo dominada por energéticos fósiles, pero se observa una tendencia en la última década por la mejora tecnología que propicie el consumo de energías limpias, aunado a la baja en los precios de dichos combustibles, lo que a su vez confirmaría el efecto sustitución en el largo plazo, que puede ser observado en una etapa temprana en la curva tecnológica de Kuznets propuesta.

Finalmente, se abre la ventana para que futuras investigaciones identifiquen los factores y actores que permitirían que la curva observada se confirme en menor tiempo y que el punto de inflexión se encuentre a niveles de ingreso menores, en línea con los objetivos internacionales de mitigación de emisiones de GEI.

Referencias

- Aden, N. (2016, abril 5). The Roads to Decoupling: 21 Countries Are Reducing Carbon Emissions While Growing GDP. *World Resources Institute Insights*. <https://www.wri.org/insights/roads-decoupling-21-countries-are-reducing-carbon-emissions-while-growing-gdp>
- Aguilera, M., Alejo, F. J., Navarrete, J. E., & Torres, R. C. (2016). Contenido y alcance de la reforma energética. *Economía UNAM*, 13(37), 3–44.
- Altamirano, J.-C., & Martínez, J. (2017, abril 14). Mexico's 3 Big Steps Towards Comprehensive Carbon Pricing. *World Resources Institute Insights*. <https://www.wri.org/insights/mexicos-3-big-steps-towards-comprehensive-carbon-pricing>
- Altamirano, J.-C., Ross, K., Fransen, T., Martínez, J., Ortiz Sánchez, E., Rissman, J., & Brown Solá, C. (2016). *Ocho puntos de acción para alcanzar las metas climáticas de México* [Documento de trabajo]. <https://www.wri.org/research/achieving-mexicos-climate-goals-eight-point-action-plan>
- Alvarado, R., Deng, Q., Tillaguango, B., Méndez, P., Bravo, D., Chamba, J., Alvarado-Lopez, M., & Ahmad, M. (2021). Do economic development and human capital decrease non-renewable energy consumption? Evidence for OECD countries. *Energy*, 215, 119147. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119147>
- Anderegg, W. R. L., Prall, J. W., Harold, J., & Schneider, S. H. (2010). Expert credibility in climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(27), 12107–12109. <https://doi.org/10.1073/pnas.1003187107>
- Ansuategi, A., Barbier, E., & Perrings, C. (1998). The environmental Kuznets curve. En J. C. J. M. Bergh & M. W. Hofkes (Eds.), *Theory and Implementation of Economic Models for Sustainable Development* (Vol. 15, pp. 139–164). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3511-7_7
- Ansuategi, A., & Escapa, M. (2002). Economic growth and greenhouse gas emissions. *Ecological Economics*, 40(1), 23–37. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(01\)00272-5](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(01)00272-5)
- Arévalo Pacheco, G. J. (2017). Curva ambiental de Kuznets en México 1960-2016. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*. <https://www.eumed.net/cursecon/ecolat/mx/2017/curva-kuznets-mexico.html>
- Arrow, K., Bolin, B., Costanza, R., Dasgupta, P., Folke, C., Holling, C. S., Jansson, B.-O., Levin, S., Mäler, K.-G., Perrings, C., & Pimentel, D. (1996). Economic growth, carrying capacity, and the environment. *Environment and Development Economics*, 1(1), 104–110. <https://doi.org/10.1017/S1355770X00000413>
- Averchenkova, A., & Guzman Luna, S. L. (2018). *Mexico's General Law on Climate Change: Key achievements and challenges ahead*. Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment and Centre for Climate Change Economics and Policy. <https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/publication/mexicos-general-law-on-climate-change-key-achievements-and-challenges-ahead/>
- Bhattacharya, M. (2019). The Environmental Kuznets Curve. En *Environmental Kuznets Curve (EKC)* (pp. 9–14). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816797-7.00002-3>
- Bilgili, F., Muğaloğlu, E., Kuşkaya, S., Bağlıtaş, H. H., & Gençoğlu, P. (2019). Most Up-to-Date Methodologic Approaches. En *Environmental Kuznets Curve (EKC)* (pp. 115–139). Elsevier. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128167977000102>
- Brock, W., & Taylor, M. S. (2004). *The Green Solow Model* (Núm. w10557; p. w10557). National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w10557>
- Cámara de Diputados. (2021). *Iniciativa del Ejecutivo federal, con proyecto de decreto, por el que se reforman los artículos 25, 27 y 28 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*,

- en materia energética*. Gaceta Parlamentaria, año XXIV, número 5877-1. <http://gaceta.diputados.gob.mx/PDF/65/2021/oct/20211001-I.pdf>
- Canal del Congreso. (2022, abril 18). *El Pleno de la Cámara de Diputados rechaza Reforma Eléctrica al no alcanzar mayoría calificada*. https://www.canaldelcongreso.gob.mx/noticias/15251/El_Pleno_de_la_Cmara_de_Diputados_rechaza_Reforma_Elctrica_al_no_alcanzar_mayora_calificada
- Catalán, H. (2020). Impacto de las energías renovables en las emisiones de gases efecto invernadero en México. *Problemas del Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía*, 52(204). <https://doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2021.204.69611>
- Centro Nacional de Control de Energía. (2018, noviembre 20). *¿Sabes qué es el Mercado Eléctrico Mayorista?* <https://www.gob.mx/cenace/es/articulos/sabes-que-es-el-mercado-electrico-mayorista?idiom=es>
- Chen, J., Hu, T. E., & van Tulder, R. (2019). Is the Environmental Kuznets Curve Still Valid: A Perspective of Wicked Problems. *Sustainability*, 11(17), 4747. <https://doi.org/10.3390/su11174747>
- Chertow, M. R. (2000). The IPAT Equation and Its Variants. *Journal of Industrial Ecology*, 4(4), 13–29. <https://doi.org/10.1162/10881980052541927>
- Chica Moreu, C. (2016). Identidad de Kaya. *Camins.cat*, 1(45), 24.
- Clarkson, R., & Deyes, K. (2002). *Estimating the Social Cost of Carbon Emissions*. HM Treasury.
- Clavellina Miller, J. L. (2021). Reacciones ante la aprobación de la Reforma a la Ley de la Industria Eléctrica. *Notas estratégicas*, 128, 1–10.
- Clavellina Miller, J. L., & Perea Corona, S. (2022). Aspectos Relevantes de la Reforma Constitucional en materia Eléctrica 2021. *Economía Informa*, 1(432), 4–15.
- Climate Watch. (2020). *GHG Emissions (Conjunto de datos)*. World Resources Institute. <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>
- Climent, F., & Pardo, A. (2007). Decoupling factors on the energy–output linkage: The Spanish case. *Energy Policy*, 35(1), 522–528. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.12.022>
- Cole, M. A. (2004). Trade, the pollution haven hypothesis and the environmental Kuznets curve: Examining the linkages. *Ecological Economics*, 48(1), 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2003.09.007>
- Cole, M. A., Rayner, A. J., & Bates, J. M. (1997). The environmental Kuznets curve: An empirical analysis. *Environment and Development Economics*, 2(4), 401–416.
- Colombo, U. (2001). The Club of Rome and sustainable development. *Futures*, 33(1), 7–11. [https://doi.org/10.1016/S0016-3287\(00\)00048-3](https://doi.org/10.1016/S0016-3287(00)00048-3)
- Comisión Reguladora de Energía. (2016, agosto 18). *Preguntas Frecuentes sobre los Certificados de Energías Limpias*. <https://www.gob.mx/cre/articulos/preguntas-frecuentes-sobre-los-certificados-de-energias-limpias>
- Cook, J., Nuccitelli, D., Green, S. A., Richardson, M., Winkler, B., Painting, R., Way, R., Jacobs, P., & Skuce, A. (2013). Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature. *Environmental Research Letters*, 8(2), 024024. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024024>
- Cook, J., Oreskes, N., Doran, P. T., Anderegg, W. R. L., Verheggen, B., Maibach, E. W., Carlton, J. S., Lewandowsky, S., Skuce, A. G., Green, S. A., Nuccitelli, D., Jacobs, P., Richardson, M., Winkler, B., Painting, R., & Rice, K. (2016). Consensus on consensus: A synthesis of consensus estimates on human-caused global warming. *Environmental Research Letters*, 11(4), 048002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/048002>

- Copeland, B. R., & Taylor, M. S. (2004). Trade, Growth, and the Environment. *Journal of Economic Literature*, 42(1), 7–71. <https://doi.org/10.1257/.42.1.7>
- Correa López, G. (2018). Medio ambiente y generación de energía en México. *Portes, Revista mexicana de estudios sobre la Cuenca del Pacífico*, 12(24), 145–161.
- Creutzig, F., Jochem, P., Edelenbosch, O. Y., Mattauch, L., Vuuren, D. P. van, McCollum, D., & Minx, J. (2015). Transport: A roadblock to climate change mitigation? *Science*, 350(6263), 911–912. <https://doi.org/10.1126/science.aac8033>
- Cserekyei, Z., & Stern, D. I. (2015). Global energy use: Decoupling or convergence? *Energy Economics*, 51, 633–641. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.08.029>
- Daly, H. E. (1993). The Perils of Free Trade. *Scientific American*, 269(5), 50–57.
- D'Arge, R. C. (1979). Climate and economic activity. En World Meteorological Organization (Ed.), *Proceedings of the World Climate Conference: A conference of experts on climate and mankind, Geneva, 12-23 February 1979* (pp. 302–317). Secretariat of the World Meteorological Organization.
- Dasgupta, S., Laplante, B., Wang, H., & Wheeler, D. (2002). Confronting the Environmental Kuznets Curve. *Journal of Economic Perspectives*, 16(1), 147–168. <https://doi.org/10.1257/0895330027157>
- de Bruyn, S. M., van den Bergh, J. C. J. M., & Opschoor, J. B. (1998). Economic growth and emissions: Reconsidering the empirical basis of environmental Kuznets curves. *Ecological Economics*, 25(2), 161–175. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(97\)00178-X](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(97)00178-X)
- de Freitas, L. C., & Kaneko, S. (2011). Decomposing the decoupling of CO2 emissions and economic growth in Brazil. *Ecological Economics*, 70(8), 1459–1469. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.02.011>
- Deka, A., & Dube, S. (2021). Analyzing the causal relationship between exchange rate, renewable energy and inflation of Mexico (1990–2019) with ARDL bounds test approach. *Renewable Energy Focus*, 37, 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2021.04.001>
- Del Río Monges, J. A., & Aburto Martínez, L. A. (2018). ¿Por qué le conviene a México eliminar gradualmente su dependencia energética respecto a los combustibles fósiles? *Pluralidad y Consenso*, 8(37), 5–26.
- Del Río Monges, J. A., Rosales Reyes, M., Ortega Olvera, V., & Maya Hernández, S. O. (2017). *Análisis de la Reforma Energética*. Instituto Belisario Domínguez. <http://bibliodigitalibd.senado.gob.mx/handle/123456789/3404>
- Deutch, J. (2017). Decoupling Economic Growth and Carbon Emissions. *Joule*, 1(1), 3–5. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.08.011>
- Diario Oficial de la Federación. (2021). *Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley de la Industria Eléctrica*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5613245&fecha=09/03/2021
- Dinda, S., & Coondoo, D. (2006). Income and emission: A panel data-based cointegration analysis. *Ecological Economics*, 57(2), 167–181. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.03.028>
- Doran, P. T., & Zimmerman, M. K. (2009). Examining the Scientific Consensus on Climate Change. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 90(3), 22. <https://doi.org/10.1029/2009EO030002>
- Ekins, P. (1997). The Kuznets Curve for the Environment and Economic Growth: Examining the Evidence. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 29(5), 805–830. <https://doi.org/10.1068/a290805>

- Enevoldsen, M. K., Ryelund, A. V., & Andersen, M. S. (2007). Decoupling of industrial energy consumption and CO₂-emissions in energy-intensive industries in Scandinavia. *Energy Economics*, 29(4), 665–692. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2007.01.016>
- EY México. (2018). *Nueva Era de la Energía en México* (p. 99). https://www.energypartnership.mx/fileadmin/user_upload/mexico/media_elements/reports/NuevaEraEnergiaMexico_ESP.pdf
- Fischer-Kowalski, M., Instituto de Ecología Social de Viena, Universidad Alpen-Adria, Swilling, A., Swilling, M., Instituto de la Sostenibilidad, & Universidad de Stellenbosch, Sudáfrica. (2011). *Decoupling Natural Resource Use and Environmental Impacts from Economic Growth: A Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel*. UNEP United Nations Environment Programme, International Resource Panel.
- Fjellvang, C. V. R. (2015). *Why did Canada withdraw from the Kyoto Protocol? A case study* (FNI Report Núm. 1/2015; p. 88). Fridtjof Nansen Institute. <https://www.fni.no/getfile.php/131693-1469868970/Filer/Publikasjoner/FNI-R0115.pdf>
- Flores Quiroga, A. (2018). *Reforma energética-hidrocarburos* (1a ed.). Fondo de Cultura Económica.
- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, M., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Le Quéré, C., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Anthoni, P., Bates, N. R., Becker, M., Bellouin, N., ... Zeng, J. (2021). *Global Carbon Budget 2021* [Preprint]. Antroposphere – Energy and Emissions. <https://doi.org/10.5194/essd-2021-386>
- Fulghum, N. (2021). *México lidera al G20 en la reducción de carbón el año pasado, pero tres cuartos de su electricidad aún provienen de combustibles fósiles* (Global Electricity Review 2021). <https://ember-climate.org/app/uploads/2022/02/Global-Electricity-Review-2021-Mexico-Translated.pdf>
- García Alcocer, G. I. (2021). La Reforma Energética de 2021 en materia de electricidad. *Pluralidad y Consenso*, 11(48), 38–43.
- García García, N., Gutiérrez Cano, A. L., Hernández Sandoval, A., Miranda López, Y. A., Yépez González, A. R., & Rodríguez Villalón, O. (2021). Análisis comparativo de la Reforma Energética 2013 y 2021 para México, en términos de competitividad y eficiencia energética. *Jóvenes en la ciencia*, 10, 1–10.
- García Hernández, A. L., & Lucatello, S. (2022). Climate policy integration: Taking advantage of policy windows? An analysis of the energy and environment sectors in Mexico (1997–2018). *Journal of Environmental Policy & Planning*, 24(1), 56–67. <https://doi.org/10.1080/1523908X.2021.1940893>
- García-Gusano, D., Suárez-Botero, J., & Dufour, J. (2018). Long-term modelling and assessment of the energy-economy decoupling in Spain. *Energy*, 151, 455–466. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.102>
- Gobierno de la República. (2016). *Intended Nationally Determined Contribution*. United Nations Framework Convention on Climate Change. <https://www4.unfccc.int/sites/NDCStaging/pages/Party.aspx?party=MEX>
- Gobierno de México, & Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2020). *Contribución Determinada a nivel Nacional: México. Versión actualizada 2020*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. <https://www4.unfccc.int/sites/NDCStaging/pages/Party.aspx?party=MEX>
- González Arellano, S., & Larralde Corona, A. H. (2018). La forma urbana actual de las zonas metropolitanas en México: Indicadores y dimensiones morfológicas. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 34(1), 11–42. <https://doi.org/10.24201/edu.v34i1.1799>

- González-Aréchiga, B., J. Díaz-Tinoco y F. Venegas-Martínez (2001). Riesgo cambiario, brecha de madurez y cobertura con futuros: análisis local y de valor en riesgo. *Economía Mexicana, Nueva Época*, 10(2), 259-290.
- Grippa, P., Schmittmann, J., & Suntheim, F. (2019). Climate Change and Financial Risk. *Finance & Development*, 56(4), 26–29.
- Grossman, G., & Krueger, A. (1991). *Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement* (Núm. w3914; p. w3914). National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w3914>
- Grubb, M., & Depledge, J. (2001). The Seven Myths of Kyoto. *Climate Policy*, 1(2), 269–272. <https://doi.org/10.3763/cpol.2001.0126>
- Gutiérrez Negrín, L. C. A. (2021). La reforma a la ley y las energías renovables. *Pluralidad y Consenso*, 11(48), 32–37.
- Haberl, H., Wiedenhofer, D., Virág, D., Kalt, G., Plank, B., Brockway, P., Fishman, T., Hausknost, D., Krausmann, F., Leon-Gruchalski, B., Mayer, A., Pichler, M., Schaffartzik, A., Sousa, T., Streeck, J., & Creutzig, F. (2020). A systematic review of the evidence on decoupling of GDP, resource use and GHG emissions, part II: Synthesizing the insights. *Environmental Research Letters*, 15(6), 065003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab842a>
- Hanley, N. (2001). Cost—Benefit Analysis and Environmental Policymaking. *Environment and Planning C: Government and Policy*, 19(1), 103–118. <https://doi.org/10.1068/c3s>
- Harrison, K. (2007). The Road not Taken: Climate Change Policy in Canada and the United States. *Global Environmental Politics*, 7(4), 92–117. <https://doi.org/10.1162/glep.2007.7.4.92>
- Holtz-Eakin, D., & Selden, T. M. (1995). Stoking the fires? CO2 emissions and economic growth. *Journal of Public Economics*, 57(1), 85–101. [https://doi.org/10.1016/0047-2727\(94\)01449-X](https://doi.org/10.1016/0047-2727(94)01449-X)
- Horowitz, C. A. (2016). Paris Agreement. *International Legal Materials*, 55(4), 740–755. <https://doi.org/10.1017/S0020782900004253>
- Hovi, J., Sprinz, D. F., & Bang, G. (2012). Why the United States did not become a party to the Kyoto Protocol: German, Norwegian, and US perspectives. *European Journal of International Relations*, 18(1), 129–150. <https://doi.org/10.1177/1354066110380964>
- Howard, P. H., & Sylvan, D. (2015). *The Economic Climate: Establishing Consensus on the Economics of Climate Change*. <https://doi.org/10.22004/AG.ECON.205761>
- Inglesi-Lotz, R. (2019). Recent Studies (Extending Basic Environmental Kuznets Curve Model by Adding More Variables). En *Environmental Kuznets Curve (EKC)* (pp. 15–23). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816797-7.00003-5>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2018, mayo 18). *Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)*. <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/mecanismo-de-desarrollo-limpio-mdl>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed.). (2000). *Special report on emissions scenarios: A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed.). (2007). *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability: contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed.). (2014). *Climate change 2014: Mitigation of climate change: Working Group III contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- International Energy Agency. (2016, marzo 16). *Decoupling of global emissions and economic growth confirmed*. <https://www.iea.org/news/decoupling-of-global-emissions-and-economic-growth-confirmed>

- Jackson, T., & Victor, P. A. (2019). Unraveling the claims for (and against) green growth. *Science*, 366(6468), 950–951. <https://doi.org/10.1126/science.aay0749>
- Jakob, M., Flachsland, C., Christoph Steckel, J., & Urpelainen, J. (2020). Actors, objectives, context: A framework of the political economy of energy and climate policy applied to India, Indonesia, and Vietnam. *Energy Research & Social Science*, 70, 101775. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101775>
- Jiang, Y., Zhou, Z., & Liu, C. (2019). The impact of public transportation on carbon emissions: A panel quantile analysis based on Chinese provincial data. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(4), 4000–4012. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3921-y>
- Kaufmann, R., Davidsdottir, B., Garnham, S., & Pauly, P. (1998). The determinants of atmospheric SO₂ concentrations: Reconsidering the environmental Kuznets curve. *Ecological Economics*, 25(2), 209–220.
- Kaya, Y., & Yokobori, K. (Eds.). (1997). *Environment, energy, and economy: Strategies for sustainability*. United Nations University Press.
- Kijima, M., Nishide, K., & Ohya, A. (2010). Economic models for the environmental Kuznets curve: A survey. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 34(7), 1187–1201. <https://doi.org/10.1016/j.jedc.2010.03.010>
- Kochi, I., & Medina López, P. C. (2013). Beyond the Environmental Kuznets Curve: Understanding the Determinants of Environmental Degradation in Mexico. *Nóesis. Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 22(43–1), 52–83.
- Kuznets, S. (1955). Economic Growth and Income Inequality. *The American Economic Review*, 45(1), 1–28.
- Kweku, D., Bismark, O., Maxwell, A., Desmond, K., Danso, K., Oti-Mensah, E., Quachie, A., & Adormaa, B. (2018). Greenhouse Effect: Greenhouse Gases and Their Impact on Global Warming. *Journal of Scientific Research and Reports*, 17(6), 1–9. <https://doi.org/10.9734/JSRR/2017/39630>
- Lamb, W. F., Wiedmann, T., Pongratz, J., Andrew, R., Crippa, M., Olivier, J. G. J., Wiedenhofer, D., Mattioli, G., Khouradajie, A. A., House, J., Pachauri, S., Figueroa, M., Saheb, Y., Slade, R., Hubacek, K., Sun, L., Ribeiro, S. K., Khennas, S., de la Rue du Can, S., ... Minx, J. (2021). A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018. *Environmental Research Letters*, 16(7), 073005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abee4e>
- Lazard. (2021). *Lazard's levelized cost of energy analysis* (15.0). <https://www.lazard.com/media/451905/lazards-levelized-cost-of-energy-version-150-vf.pdf>
- Levin, A., Lin, C.-F., & James Chu, C.-S. (2002). Unit root tests in panel data: Asymptotic and finite-sample properties. *Journal of Econometrics*, 108(1), 1–24. [https://doi.org/10.1016/S0304-4076\(01\)00098-7](https://doi.org/10.1016/S0304-4076(01)00098-7)
- Ley de la Industria Eléctrica. (2021). Diario Oficial de la Federación. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lielec.htm>
- Limón Portillo, A. (s/f). *La reorganización de la industria eléctrica en México*. Recuperado el 15 de mayo de 2022, de <https://ciep.mx/Iy4x>
- Liu, C., Jiang, Y., & Xie, R. (2019). Does income inequality facilitate carbon emission reduction in the US? *Journal of Cleaner Production*, 217, 380–387. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.242>
- López, R. (1994). The Environment as a Factor of Production: The Effects of Economic Growth and Trade Liberalization. *Journal of Environmental Economics and Management*, 27(2), 163–184. <https://doi.org/10.1006/jeem.1994.1032>

- Lu, Z., & Mao, J. (2003). Crossing “Environmental Mountain”——On the Increase and Decrease of Environment Impact in the Process of Economic Growth. *Strategic Study of Chinese Academy of Engineering*, 5(12), 36–42.
- Lu, Z., Wang, H., & Yue, Q. (2011). Decoupling indicators: Quantitative relationships between resource use, waste emission and economic growth. *Resources Science*, 33(1), 2–9.
- Luo, Y., Long, X., Wu, C., & Zhang, J. (2017). Decoupling CO2 emissions from economic growth in agricultural sector across 30 Chinese provinces from 1997 to 2014. *Journal of Cleaner Production*, 159, 220–228. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.076>
- Ma, X.-W., Ye, Y., Shi, X.-Q., & Zou, L.-L. (2016). Decoupling economic growth from CO2 emissions: A decomposition analysis of China’s household energy consumption. *Advances in Climate Change Research*, 7(3), 192–200. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2016.09.004>
- Mandell, S. (2011). Carbon emission values in cost benefit analyses. *Transport Policy*, 18(6), 888–892. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2011.06.005>
- Marmolejo-Cervantes, M. (2019). The recognition of climate-change effects as a risk to financial stability in Mexico: The role of the Central Bank. *International and Comparative Corporate Law Journal*, 13(3), 94–110.
- Martínez-Zarzoso, I., & Bengochea-Morancho, A. (2004). Pooled mean group estimation of an environmental Kuznets curve for CO2. *Economics Letters*, 82(1), 121–126. <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2003.07.008>
- McConnell, K. E. (1997). Income and the demand for environmental quality. *Environment and Development Economics*, 2(4), 383–399. <https://doi.org/10.1017/S1355770X9700020X>
- McKenzie, R., Bernhard, G., Ben, L., Disterhoft, P., Rhodes, S., Bais, A., Morgenstern, O., Newman, P., Oman, L., Brogniez, C., & Simic, S. (2019). Success of Montreal Protocol Demonstrated by Comparing High-Quality UV Measurements with “World Avoided” Calculations from Two Chemistry-Climate Models. *Scientific Reports*, 9(12332), 13. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48625-z>
- McNeill, V. F. (2020). Mario Molina (1943–2020). *Nature*, 587(7833), 193–193. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-03133-3>
- Meinshausen, M., Lewis, J., McGlade, C., Gütschow, J., Nicholls, Z., Burdon, R., Cozzi, L., & Hackmann, B. (2022). Realization of Paris Agreement pledges may limit warming just below 2 °C. *Nature*, 604(7905), 304–309. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04553-z>
- Mele, M. (2019). Renewable Energy Consumption: The Effects on Economic Growth in Mexico. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 9(3), 269–273. <https://doi.org/10.32479/ijeeep.7460>
- Mielnik, O., & Goldemberg, J. (2002). Foreign direct investment and decoupling between energy and gross domestic product in developing countries. *Energy Policy*, 30(2), 87–89. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(01\)00080-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(01)00080-5)
- Mikayilov, J. I., Hasanov, F. J., & Galeotti, M. (2018). Decoupling of CO2 emissions and GDP: A time-varying cointegration approach. *Ecological Indicators*, 95, 615–628. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.07.051>
- Molina, M., & Zaelke, D. (2017, noviembre 20). *The Montreal Protocol: Triumph by treaty*. <https://www.unep.org/news-and-stories/story/montreal-protocol-triumph-treaty>
- Montaud, J.-M., & Pecastaing, N. (2016). Does Mexico benefit from the Clean Development Mechanism? A model-based scenario general equilibrium analysis. *Environment and Development Economics*, 21(2), 226–248. <https://doi.org/10.1017/S1355770X15000169>

- Naciones Unidas. (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/convsp.pdf
- Naciones Unidas. (1998). *Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
- Naciones Unidas. (2012). *Enmienda de Doha al Protocolo de Kyoto*. https://unfccc.int/files/kyoto_protocol/application/pdf/kp_doha_amendment_spanish.pdf
- Naciones Unidas. (2015). *Acuerdo de París*. https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf
- Naciones Unidas. (2020, junio 17). *Todavía es posible alcanzar la segunda fase de reducción de emisiones de Kyoto pero es necesaria más ambición*. <https://unfccc.int/es/news/todavia-es-posible-alcanzar-la-segunda-fase-de-reduccion-de-emisiones-de-kyoto-pero-es-necesaria-mas>
- Naciones Unidas. (2022a). *7. D Paris Agreement*. https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=_en
- Naciones Unidas. (2022b). *7. United Nations Framework Convention on Climate Change*. https://treaties.un.org/Pages/ViewDetailsIII.aspx?src=IND&mtdsg_no=XXVII-7&chapter=27&Temp=mtdsg3&clang=_en#1
- Naciones Unidas. (2022c). *The Doha Amendment*. <https://unfccc.int/es/node/404>
- Nanthakumar, L., & Subramaniam, T. (2010). Dynamic Cointegration Link between Energy Consumption and Economic Performance: Empirical Evidence from Malaysia. *International Journal of Trade, Economics and Finance*, 1(3), 261–267. <https://doi.org/10.7763/IJTEF.2010.V1.47>
- Naqvi, A., & Zwickl, K. (2017). Fifty shades of green: Revisiting decoupling by economic sectors and air pollutants. *Ecological Economics*, 133, 111–126. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.09.017>
- Navarrete, M., Brull, M., Torre, A., Gómez, D., & Diana, G. T. (2009). Verificación de la Curva Ambiental De Kuznets: El caso de México. *Revista Estudiantil de Economía*, 1(1), 37–54.
- Nordhaus, W. D. (1975). *Can We Control Carbon Dioxide?* International Institute for Applied Systems Analysis. <http://pure.iiasa.ac.at/365>
- Nordhaus, W. D. (1977). Economic Growth and Climate: The Carbon Dioxide Problem. *The American Economic Review*, 67(1), 341–346.
- Nordhaus, W. D. (1991). To Slow or Not to Slow: The Economics of The Greenhouse Effect. *The Economic Journal*, 101(407), 920. <https://doi.org/10.2307/2233864>
- Nordhaus, W. D. (1993a). Rolling the ‘DICE’: An optimal transition path for controlling greenhouse gases. *Resource and Energy Economics*, 15(1), 27–50. [https://doi.org/10.1016/0928-7655\(93\)90017-O](https://doi.org/10.1016/0928-7655(93)90017-O)
- Nordhaus, W. D. (1993b). Optimal Greenhouse-Gas Reductions and Tax Policy in the “DICE” Model William D. Nordhaus. *The American Economic Review*, 83(2), 313–317.
- Nordhaus, W. D. (2017a). Revisiting the social cost of carbon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(7), 1518–1523. <https://doi.org/10.1073/pnas.1609244114>
- Nordhaus, W. D. (2017b). *Evolution of Assessments of the Economics of Global Warming: Changes in the DICE model, 1992 – 2017* (Número w23319; p. w23319). National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w23319>
- Nordhaus, W. D. (2019). Climate Change: The Ultimate Challenge for Economics. *American Economic Review*, 109(6), 1991–2014. <https://doi.org/10.1257/aer.109.6.1991>

- Oreskes, N. (2004). The Scientific Consensus on Climate Change. *Science*, 306(5702), 1686–1686. <https://doi.org/10.1126/science.1103618>
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2002). *Indicators to Measure Decoupling of Environmental Pressure from Economic Growth*. [https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?doclanguage=en&cote=sg/sd\(2002\)1/final](https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?doclanguage=en&cote=sg/sd(2002)1/final)
- Pachauri, R. K., & IPCC (Eds.). (2008). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.
- Panayotou, T. (1993). *Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development*.
- Panayotou, T. (1997). Demystifying the environmental Kuznets curve: Turning a black box into a policy tool. *Environment and Development Economics*, 2(4), 465–484.
- Pasten, R., & Figueroa B., E. (2012). The Environmental Kuznets Curve: A Survey of the Theoretical Literature. *International Review of Environmental and Resource Economics*, 6(3), 195–224. <https://doi.org/10.1561/101.00000051>
- Pearson, P. J. G. (1994). Energy, Externalities and Environmental Quality: Will Development Cure the Ills It Creates? *Energy Studies Review*, 6(3), 199–216.
- Pérez Pérez, C. S., & Nieto Barajas, L. E. (2019). Análisis jerárquico de las emisiones de gases efecto invernadero en México. *Realidad, Datos y Espacio Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 10(3), 28–41.
- Pérez-Cirera, V., Schmelkes, E., López-Corona, O., Carrera, F., García-Teruel, A. P., & Teruel, G. (2018). Ingreso y calidad del aire en ciudades. ¿Existe una curva de Kuznets para las emisiones del transporte en la Zona Metropolitana del Valle de México? *El Trimestre Económico*, 85(340), 745. <https://doi.org/10.20430/ete.v85i340.717>
- Pindyck, R. S. (2013). Climate Change Policy: What Do the Models Tell Us? *Journal of Economic Literature*, 51(3), 860–872. <https://doi.org/10.1257/jel.51.3.860>
- Pischke, E. C., Solomon, B., Wellstead, A., Acevedo, A., Eastmond, A., De Oliveira, F., Coelho, S., & Lucon, O. (2019). From Kyoto to Paris: Measuring renewable energy policy regimes in Argentina, Brazil, Canada, Mexico and the United States. *Energy Research & Social Science*, 50, 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.11.010>
- Pizer, W., Adler, M., Aldy, J., Anthoff, D., Cropper, M., Gillingham, K., Greenstone, M., Murray, B., Newell, R., Richels, R., Rowell, A., Waldhoff, S., & Wiener, J. (2014). Using and improving the social cost of carbon. *Science*, 346(6214), 1189–1190. <https://doi.org/10.1126/science.1259774>
- Powell, D. (2020). Quantile Treatment Effects in the Presence of Covariates. *The Review of Economics and Statistics*, 102(5), 994–1005. https://doi.org/10.1162/rest_a_00858
- Powell, D. (2022). Quantile regression with nonadditive fixed effects. *Empirical Economics*, 63(5), 2675–2691. <https://doi.org/10.1007/s00181-022-02216-6>
- Prest, B. C. (2018). Explanations for the 2014 oil price decline: Supply or demand? *Energy Economics*, 74, 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.05.029>
- Raissi, M., Parry, I., Kirabaeva, K., Black, S., & Zhunussova, K. (2021). A Comprehensive Climate Mitigation Strategy for Mexico. *IMF Working Papers*, 2021(246), 1. <https://doi.org/10.5089/9781513599847.001>
- Ren, S., & Hu, Z. (2012). Effects of decoupling of carbon dioxide emission by Chinese nonferrous metals industry. *Energy Policy*, 43, 407–414. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.01.021>

- Richmond, A. K., & Kaufmann, R. K. (2006). Is there a turning point in the relationship between income and energy use and/or carbon emissions? *Ecological Economics*, 56(2), 176–189. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.01.011>
- Rissman, J., Bataille, C., Masanet, E., Aden, N., Morrow, W. R., Zhou, N., Elliott, N., Dell, R., Heeren, N., Huckestein, B., Cresko, J., Miller, S. A., Roy, J., Fennell, P., Cremmins, B., Koch Blank, T., Hone, D., Williams, E. D., de la Rue du Can, S., ... Helseth, J. (2020). Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070. *Applied Energy*, 266, 114848. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114848>
- Rodríguez-Benavides, D., I. Perrotini-Hernández y F. Venegas-Martínez (2012). La Hipótesis de Convergencia en América Latina: un análisis de cointegración en panel. *EconoQuantum, Revista de Economía y Negocios*, 9(2), 99-122.
- Ruiz, G., Rodríguez, C., Ochoa, C., & Rueda, R. (2021, octubre 8). La Reforma Energética en México. *Holland & Knight Alert*. <https://www.hklaw.com/es/insights/publications/2021/10/la-reforma-energetica-en-mexico>
- Ruz Saldívar, C., & Ulloa Cuéllar, A. L. (2019). Reflexiones sobre el cambio climático y el acuerdo de París, la implementación en México. *Revista de Derechos Humanos y Estudios Sociales*, 6(21), 27–40.
- Salazar-Núñez, H. F., Venegas-Martínez, F., & Lozano-Díez, J. A. (2021). Assessing the interdependence among renewable and non-renewable energies, economic growth, and CO2 emissions in Mexico. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01968-y>
- Santillán-Salgado, R. J., Valencia-Herrera, H., & Venegas-Martínez, F. (2020). On the Relations among CO2 Emissions, Gross Domestic Product, Energy Consumption, Electricity Use, Urbanization, and Income Inequality for a Sample of 134 Countries. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 10(6), 195–207. <https://doi.org/10.32479/ijjep.10070>
- Sarkodie, S. A., & Strezov, V. (2019). Effect of foreign direct investments, economic development and energy consumption on greenhouse gas emissions in developing countries. *Science of The Total Environment*, 646, 862–871. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.365>
- Schelling, T. C. (1992). Some Economics of Global Warming. *American Economic Review*, 82(1), 1–14.
- Secretaría de Energía. (2018). *Fuentes de energía en México*. http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D2_R_ENERGIA01_01&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce#:~:text=Las%20principales%20fuentes%20renovables%20consideradas,Balance%20se%20le%20considera%20renovable.
- Secretaría de Energía. (2021). *Tercer informe de labores*. Gobierno de México. <https://base.energia.gob.mx/IL/3-Informe-de-labores-SENER.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2015, noviembre 24). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y su Protocolo de Kioto. (CMNUCC)*. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/convencion-marco-de-las-naciones-unidas-sobre-el-cambio-climatico-y-su-protocolo-de-kioto-cmnucc#:~:text=La%20Convenci%C3%B3n%20Marco%20de%20las,de%20diciembre%20del%20mismo%20a%C3%B1o>.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018a). *Inventario Nacional de Energías Limpias*. http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D2_R_ENERGIA03_03&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018b, abril 26). *Principales cambios en la Ley General de Cambio Climático*. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/principales-cambios-en-la-ley-general-de-cambio-climatico>

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2022, febrero 17). *Protocolo de Montreal relativo a las Sustancias que Agotan la Capa de Ozono (Protocolo de Montreal)*. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/protocolo-de-montreal-relativo-a-las-sustancias-que-agotan-la-capa-de-ozono-protocolo-de-montreal>
- Shafik, N. (1994). Economic Development and Environmental Quality: An Econometric Analysis. *Oxford Economic Papers*, 46, 757–773.
- Shafik, N., & Bandyopadhyay, S. (1992). Economic growth and environmental quality: Time series and cross-country evidence. *Policy Research Working Paper Series*, 904. <https://EconPapers.repec.org/RePEc:wbk:wbrwps:904>
- Sharma, C. (2022). Greenhouse gas effects on international tourism: A panel quantile evidence. *Anatolia*, 33(2), 266–269. <https://doi.org/10.1080/13032917.2021.1919907>
- Shishlov, I., Morel, R., & Bellassen, V. (2016). Compliance of the Parties to the Kyoto Protocol in the first commitment period. *Climate Policy*, 16(6), 768–782. <https://doi.org/10.1080/14693062.2016.1164658>
- Silva Rodríguez de San Miguel, J. A. (2018). Climate change initiatives in Mexico: A review. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 29(6), 1042–1058. <https://doi.org/10.1108/MEQ-03-2018-0066>
- Silva Rodríguez de San Miguel, J. A. (2019). Energía renovable en México: Retos y oportunidades. *Espacios*, 40(25), 29.
- Solorio Sandoval, I. F., Carrillo Jiménez, A. R., & Guzmán Gómez, I. M. (2020). La arquitectura institucional de la política climática de México: Un análisis desde el enfoque de integración de políticas. *Estudios Políticos*, 51, 191–216.
- Spash, C. L. (2016). This Changes Nothing: The Paris Agreement to Ignore Reality. *Globalizations*, 13(6), 928–933. <https://doi.org/10.1080/14747731.2016.1161119>
- Stern, D. I. (1998). Progress on the environmental Kuznets curve? *Environment and Development Economics*, 3(2), 173–196.
- Stern, D. I. (2004). The Rise and Fall of the Environmental Kuznets Curve. *World Development*, 32(8), 1419–1439. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2004.03.004>
- Stern, D. I. (2017). The environmental Kuznets curve after 25 years. *Journal of Bioeconomics*, 19(1), 7–28. <https://doi.org/10.1007/s10818-017-9243-1>
- Stern, D. I. (2018). The Environmental Kuznets Curve ☆. En *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences* (p. B9780124095489094000). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09278-2>
- Stern, N. (2008). The Economics of Climate Change. *American Economic Review*, 98(2), 1–37. <https://doi.org/10.1257/aer.98.2.1>
- Stuart, D., Gunderson, R., & Petersen, B. (2020). *The Degrowth Alternative: A Path to Address our Environmental Crisis?* (1a ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003019305>
- Suri, V., & Chapman, D. (1998). Economic growth, trade and energy: Implications for the environmental Kuznets curve. *Ecological Economics*, 25(2), 195–208. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(97\)00180-8](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(97)00180-8)
- Tahvonen, O., & Kuuluvainen, J. (1993). Economic Growth, Pollution, and Renewable Resources. *Journal of Environmental Economics and Management*, 24(2), 101–118. <https://doi.org/10.1006/jeeem.1993.1007>
- Tapio, P. (2005). Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001. *Transport Policy*, 12(2), 137–151. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2005.01.001>

- The Nobel Prize in Chemistry 1995. (2022, marzo 23). The Nobel Prize in Chemistry 1995. *Nobel Prize Outreach AB 2022*. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1995/summary/>
- Tol, R. S. J. (2018). The Economic Impacts of Climate Change. *Review of Environmental Economics and Policy*, 12(1), 4–25. <https://doi.org/10.1093/reep/rex027>
- Tollefson, J. (2018). Global industrial carbon emissions to reach all-time high in 2018. *Nature*, d41586-018-07666–6. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-07666-6>
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (s/f). *Mechanisms under the Kyoto Protocol*. Recuperado el 14 de mayo de 2022, de <https://unfccc.int/es/node/407>
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2008). *Kyoto Protocol reference manual on accounting of emissions and assigned amount*. https://unfccc.int/sites/default/files/08_unfccc_kp_ref_manual.pdf
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2011). *Compilation and synthesis of fifth national communications*. <https://unfccc.int/resource/docs/2011/sbi/eng/inf01.pdf>
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2014). *Compilation and synthesis of sixth national communications and first biennial reports from Parties included in Annex I to the Convention*. <https://unfccc.int/resource/docs/2014/sbi/eng/inf20.pdf>
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2015, marzo 28). *Mexico Submits its Climate Action Plan Ahead of 2015 Paris Agreement*. <https://unfccc.int/news/mexico-submits-its-climate-action-plan-ahead-of-2015-paris-agreement>
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2022a). *El Acuerdo de París*. <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/el-acuerdo-de-paris>
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2022b). *¿Qué es el Protocolo de Kyoto?* https://unfccc.int/es/kyoto_protocol
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2022c). What is the United Nations Framework Convention on Climate Change? *Climate Change*. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-convention/what-is-the-united-nations-framework-convention-on-climate-change>
- Urban, F., Benders, R. M. J., & Moll, H. C. (2007). Modelling energy systems for developing countries. *Energy Policy*, 35(6), 3473–3482. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.12.025>
- U.S. Rejection of Kyoto Protocol Process. (2001). *American Journal of International Law*, 95(3), 647–650. <https://doi.org/10.2307/2668508>
- Valencia-Herrera, H., Santillán-Salgado, R. J., & Venegas-Martínez, F. (2020). On the Interaction among Economic Growth, Energy-Electricity Consumption, CO2 Emissions, and Urbanization in Latin America. *Revista Mexicana de Economía y Finanzas*, 15(4), 745–767. <https://doi.org/10.21919/remef.v15i4.553>
- van den Bergh, J. C. J. M., & Botzen, W. J. W. (2015). Monetary valuation of the social cost of CO 2 emissions: A critical survey. *Ecological Economics*, 114, 33–46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.03.015>
- Vargas Suárez, R. (2015). Reforma energética: De servicio público a modelo de negocios. *Política y cultura*, 43, 125–145.
- Vázquez, A. L. (2015). Desarrollo y perspectivas de energía renovable en México. *Economía Informa*, 390, 132–135. [https://doi.org/10.1016/S0185-0849\(15\)30010-4](https://doi.org/10.1016/S0185-0849(15)30010-4)
- Vehmas, J., Luukkanen, J., & Kaivo-oja, J. (2007). Linking analyses and environmental Kuznets curves for aggregated material flows in the EU. *Journal of Cleaner Production*, 15(17), 1662–1673. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.08.010>
- Venegas-Martínez, F. (2000). On Consumption, Investment and Risk. *Economía Mexicana, Nueva Época*, 9(2), 227-244.

- Venegas-Martínez, F. (2008). *Riesgos financieros y económicos: Productos derivados y decisiones económicas bajo incertidumbre*, 2da. Edición. Cengage Learning, México.
- Viscidi, L. (2018). *El futuro de la energía renovable en México* (La nueva reforma energética de México, pp. 159–178). Instituto México Woodrow Wilson Center. https://www.wilsoncenter.org/sites/default/files/media/documents/publication/la_nueva_reforma_energetica_de_mexico.pdf
- Vogel, M. P. (1999). *Environmental Kuznets Curves: A Study on the Economic Theory and Political Economy of Environmental Quality Improvements in the Course of Economic Growth*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-58517-3>
- Vural, G. (2021). Analyzing the impacts of economic growth, pollution, technological innovation and trade on renewable energy production in selected Latin American countries. *Renewable Energy*, *171*, 210–216. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.072>
- Wang, W., Li, M., & Zhang, M. (2017). Study on the changes of the decoupling indicator between energy-related CO₂ emission and GDP in China. *Energy*, *128*, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.004>
- Watkiss, P., & Hope, C. (2011). Using the social cost of carbon in regulatory deliberations. *WIREs Climate Change*, *2*(6), 886–901. <https://doi.org/10.1002/wcc.140>
- Wooldridge, J. M. (2002). *Econometric analysis of cross section and panel data*. MIT Press.
- World Bank. (1992). *World development report. 1992: Development and the environment* (2. print). World Bank.
- World Bank. (2021). *Global Economic Prospects, June 2021*. The World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1665-9>
- World Bank. (2022). *The World Bank Atlas method—Detailed methodology*. <https://datahelpdesk.worldbank.org/knowledgebase/articles/378832-what-is-the-world-bank-atlas-method>
- World Resources Institute. (2015). *CAIT country greenhouse gas emissions sources & methods*. World Resources Institute. http://cait.wri.org/docs/CAIT2.0_CountryGHG_Methods.pdf
- World Resources Institute. (2022). *Climate Watch Country Greenhouse Gas Emissions Data Method Note*. World Resources Institute. https://wri-sites.s3.us-east-1.amazonaws.com/climatewatch.org/www.climatewatch.org/climate-watch/wri_metadata/CW_GHG_Method_Note.pdf
- Wu, Y., Zhu, Q., & Zhu, B. (2018). Decoupling analysis of world economic growth and CO₂ emissions: A study comparing developed and developing countries. *Journal of Cleaner Production*, *190*, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.139>
- Yang, J., Hao, Y., & Feng, C. (2021). A race between economic growth and carbon emissions: What play important roles towards global low-carbon development? *Energy Economics*, *100*, 105327. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105327>
- Young, O. R. (2016). The Paris Agreement: Destined to Succeed or Doomed to Fail? *Politics and Governance*, *4*(3), 124–132. <https://doi.org/10.17645/pag.v4i3.635>
- Yu, Y., Chen, D., Zhu, B., & Hu, S. (2013). Eco-efficiency trends in China, 1978–2010: Decoupling environmental pressure from economic growth. *Ecological Indicators*, *24*, 177–184. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.06.007>
- Zhao, X., Zhang, X., Li, N., Shao, S., & Geng, Y. (2017). Decoupling economic growth from carbon dioxide emissions in China: A sectoral factor decomposition analysis. *Journal of Cleaner Production*, *142*, 3500–3516. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.117>

Ταγκίρης, Δ., & Tagkiris, D. (2022). *The interconnection between 2000s energy crisis and the global financial crisis. The role of NOCs and IOCs as part of the global recession.* 66.
https://doi.org/10.26267/UNIPI_DIONE/1691

ANEXOS

Anexo 1

Tabla 13. Países de la muestra

País	Incluido en modelo econométrico
Antigua y Barbuda	No
Barbados	Sí
Belice	Sí
Brunei Darussalam	Sí
Burkina Faso	Sí
El Reino de Arabia Saudita	Sí
Estado Plurinacional de Bolivia	Sí
Estados Unidos Mexicanos	Sí
Granada	No
Malasia	Sí
Mancomunidad de Dominica	Sí
Mancomunidad de las Bahamas	No
Nepal	Sí
Reino de Bután	Sí
Reino de Dinamarca	Sí
Reino de Esuatini	Sí
Reino de Lesoto	No
Reino de los Países Bajos	Sí
Reino de Marruecos	Sí
Reino de Noruega	Sí
Reino de Suecia	Sí
Reino Hachemita de Jordania	Sí
República Árabe de Egipto	Sí
República Argentina	Sí
República Cooperativa de Guyana	Sí
República de Austria	Sí
República de Benín	Sí
República de Botsuana	Sí
República de Bulgaria	Sí
República de Cabo Verde	No
República de Camerún	Sí
República de Chile	Sí
República de Chipre	No
República de Colombia	Sí
República de Corea	Sí
República de Costa Rica	Sí

República de Filipinas	Sí
República de Finlandia	Sí
República de Fiyi	Sí
República de Guatemala	Sí
República de Guinea	Sí
República de Haití	Sí
República de Honduras	Sí
República de Indonesia	Sí
República de Irak	No
República de Kiribati	No
República de la India	Sí
República de Malawi	Sí
República de Malí	Sí
República de Mauricio	Sí
República de Nicaragua	Sí
República de Panamá	Sí
República de Ruanda	Sí
República de Senegal	Sí
República de Seychelles	No
República de Sudáfrica	Sí
República de Surinam	Sí
República de Togo	Sí
República de Trinidad y Tobago	Sí
República de Turquía	Sí
República de Uganda	Sí
República de Zambia	Sí
República de Zimbabue	Sí
República del Congo	Sí
República del Ecuador	Sí
República del Paraguay	Sí
República del Salvador	Sí
República del Sudán	Sí
República Democrática del Congo	Sí
República Democrática Federal de Etiopía	Sí
República Dominicana	Sí
República Federal de Nigeria	Sí
República Federativa de Brasil	Sí
República Francesa	Sí
República Gabonesa	Sí
República Islámica de Irán	No
República Islámica de Mauritania	Sí
República Islámica de Pakistán	Sí

República Oriental del Uruguay	Sí
República Popular de Bangladés	Sí
República Popular de China	Sí
República Socialista Democrática de Sri Lanka	Sí
Saint Kitts y Nevis	No
San Vicente y las Granadinas	Sí
Santa Lucía	No
Unión de las Comoras	Sí