



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ECONÓMICAS Y EMPRESARIALES**

**DOCTORADO EN CIENCIAS EN NEGOCIOS INTERNACIONALES**

**“EL FENÓMENO DEL CAMBIO CLIMÁTICO: UN ESTUDIO DE LAS EMISIONES DE  
CO2 MEDIANTE LA CURVA AMBIENTAL DE KUZNETS Y LA HIPÓTESIS DEL  
PARAÍSO DE CONTAMINACIÓN EN MÉXICO”**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE**

**DOCTOR EN CIENCIAS EN NEGOCIOS INTERNACIONALES**

**PRESENTA:**

**OSCAR NICOLÁS NICANOR**

**DIRECTOR:**

**DR. JOSÉ CARLOS ALEJANDRO RODRÍGUEZ CHÁVEZ**

**MORELIA MICHOACÁN, DICIEMBRE DE 2024.**



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ECONÓMICAS Y EMPRESARIALES  
COORDINACIÓN DEL DOCTORADO EN CIENCIAS EN NEGOCIOS INTERNACIONALES

Dra. América Ivonne Zamora Torres  
Presidenta del H. Consejo Técnico  
Instituto de Investigaciones Económicas y Empresariales


**Presente**


Por medio de la presente nos permitimos hacer de su conocimiento que, una vez revisada la Tesis Doctoral titulada **“El fenómeno del cambio climático: un estudio de las emisiones de CO2 mediante la curva ambiental de Kuznets y la hipótesis del paraíso de contaminación en México”**, del M.C.N.I. **Oscar Nicolás Nicanor**, alumno del Doctorado en Ciencias en Negocios Internacionales, que se ofrece en este Instituto, hemos encontrado que satisface plenamente los requerimientos hechos por el Jurado Sinodal, por lo que otorgamos nuestra autorización para que se lleve a cabo la impresión de la versión definitiva de la citada tesis y se continúe con el proceso de graduación correspondiente.


Sin otro asunto que tratar por el momento, aprovechamos para enviarle un cordial saludo y quedamos a sus órdenes para cualquier aclaración al respecto.


**Atentamente**


Morelia, Mich., 03 de diciembre de 2024.

  
Dr. José Carlos Alejandro Rodríguez Chávez  
Presidente

  
Dr. Mario Gómez Aguirre  
Secretario

*Jerjes*  
  
Dr. Jerjes I. Aguirre Ochoa  
Primer vocal

  
Dra. Dora Aguila-socho Montoya  
Segundo Vocal

  
Dr. Enrique Arnás Arévalos  
Tercer Vocal

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES  
ECONÓMICAS Y EMPRESARIALES

**CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS**

En la ciudad de Morelia, Michoacán, el día 03 de diciembre de 2024, el que suscribe **M.C. Oscar Nicolás Nicanor**, alumno del **Programa de Doctorado en Ciencias en Negocios Internacionales** adscrito al Instituto de Investigaciones Económicas y Empresariales, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección del **Dr. José Carlos Rodríguez Chávez** y cede los derechos del trabajo titulado **“El fenómeno del cambio climático: un estudio de las emisiones de CO<sub>2</sub> mediante la curva ambiental de Kuznets y la hipótesis del paraíso de contaminación en México”** a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin permiso expreso del autor y/o director del mismo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: **0850339h@umich.mx**. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

ATENTAMENTE



M.C. Oscar Nicolás Nicanor

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ECONÓMICAS Y EMPRESARIALES  
DOCTORADO EN CIENCIAS EN NEGOCIOS INTERNACIONALES

CARTA DE ORIGINALIDAD

A QUIEN CORRESPONDA. –


Por este medio se hace constar que el trabajo de tesis titulado “**El fenómeno del cambio climático: un estudio de las emisiones de CO2 mediante la curva ambiental de Kuznets y la hipótesis del paraíso de contaminación en México**”, realizado por el alumno **M.C. Oscar Nicolás Nicanor** con matrícula **0850339H** del **Doctorado en Ciencias en Negocios Internacionales**, dirigido por el **Dr. José Carlos Alejandro Rodríguez Chávez**, fue analizado a través de la herramienta de detección de plagio **Turnitin** y de manera interna con la herramienta **Plagium**.

Con base en el reporte de las similitudes encontradas por dichas herramientas informáticas, **se considera que el trabajo de tesis no constituye un plagio** con respecto a obras de terceros.

Los resultados del análisis se encuentran bajo resguardo de la coordinación del **Doctorado en Ciencias en Negocios Internacionales** y de la Secretaría Académica del Instituto de Investigaciones Económicas y Empresariales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

ATENTAMENTE. –

Morelia, Mich., a 03 de diciembre de 2024.

  
Dr. José Carlos Rodríguez Chávez

Director de Tesis

  
M.C. Oscar Nicolás Nicanor

Alumno

## **A Dios**

Por permitirme encontrar en los saberes de la ciencia un sentido para ver,  
aprender y vivir en el mundo.

## **A mi madre María Guadalupe y a mi hija María Fernanda**

Porque con su amor simplemente la vida es otra mejor. Gracias madre, gracias  
hija, las amo.

## **A mis abuelos María Rojas y Franciso Nicanor**

Que no solamente me criaron cuando niño, también me dieron la ilusión de poder  
llegar a este momento.

## **A mi familia**

Que ha estado presente en momentos que hacen a la familia y de quien me siento  
agradecido por todo su apoyo.

## **Agradecimientos**

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y al Instituto de Investigaciones Económicas y Empresariales porque el aprendizaje en sus aulas, el humanismo y la calidad educativa que los caracteriza son pilares de mi formación académica.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por la beca económica recibida durante el programa de doctorado y por la oportunidad de formarme con sus estándares de calidad en el posgrado.

A mi director de tesis el Dr José Carlos Alejandro Rodríguez Chávez por todo su consejo, guía y apoyo a lo largo del proceso de tesis y de titulación, las repetidas veces que escuchó mis ideas y me animó a seguir con el trabajo hicieron posible, con mucho, la culminación de este objetivo.

Al coordinador del Doctorado en Ciencias en Negocios Internacionales, el Dr Mario Gómez Aguirre que también es el secretario de la mesa sinodal, por sus importantes recomendaciones y orientación en todo momento a lo largo de este proceso.

A los integrantes de mi mesa sinodal de evaluación, el Dr Jerjes Aguirre Ochoa, el Dr Enrique Armas Arévalo y la Dra Dora Aguilasocho Montoya por sus valiosas recomendaciones al desarrollo de este trabajo.

A mis amigos y compañeros del Tecnológico de Morelia que me animaron en esas épocas de entregas finales. A los amigos que con su amistad, pláticas y partidos de fútbol dieron un respiro para seguirle a la tesis. A todas las personas que hicieron posible este acontecimiento de vida y que comparten esta alegría ¡Gracias!

## Índice

<b>Relación de figuras, tablas y ecuaciones</b> .....	ix
<b>Siglas y abreviaturas</b> .....	xi
<b>Resumen</b> .....	xiii
<b>Abstract</b> .....	xiv
<b>Introducción</b> .....	15
<b>Capítulo I. Fundamentos de la investigación científica</b> .....	19
1.1 Elementos clave de esta investigación .....	19
1.1.1 Planteamiento del problema .....	20
1.1.2 Preguntas de investigación .....	37
1.1.3 Objetivos de la investigación .....	38
1.1.4 Hipótesis .....	38
1.1.5 Identificación de variables .....	40
1.1.6 Justificación .....	40
<b>Capítulo II. El fenómeno del cambio climático</b> .....	42
2.1 El cambio climático y los mecanismos que lo originan .....	43
2.1.1 El balance energético de la tierra .....	44
2.1.2 El efecto invernadero .....	51
2.1.3 Interacciones biofísicas y biogeoquímicas del clima .....	54
2.1.4 Los conceptos del calentamiento global y cambio climático .....	59
2.2 Los gases de efecto invernadero .....	61
2.2.1 Naturaleza de los gases de efecto invernadero .....	61
2.2.2 Emisiones globales de GEI .....	68
2.2.3 Emisiones por sector .....	72
2.2.4 Actividades económicas que generan gases de efecto invernadero .....	81
2.3 CO <sub>2</sub> y crecimiento económico en México .....	84
2.3.1 Las emisiones de CO <sub>2</sub> en México .....	84
2.3.2 Emisiones de CO <sub>2</sub> , Producto Interno Bruto y consumo de energía fosil. ....	89
2.3.3 Flujos de inversión extranjera directa en México .....	98
2.3.4 Consumo de energía renovable .....	99
<b>Capítulo III. ¿Hacia una reducción del CO<sub>2</sub>? Los argumentos teóricos de la Curva Ambiental de Kuznets y la Hipótesis del Paraíso de contaminación</b> .....	104
3.1 La curva ambiental de Kuznets .....	104

3.1.1 Efectos de escala, composición y técnico .....	135
3.1.2 Elasticidad renta de la calidad ambiental .....	137
3.1.3 Comercio internacional .....	138
3.2 La hipótesis del paraíso de contaminación.....	139
<b>Capítulo IV. Estudios empíricos sobre la CAK y la PHH .....</b>	<b>157</b>
4.1 Revisión de literatura empírica sobre la CAK y PHH .....	158
4.2 México y Latinoamérica .....	172
<b>Capítulo V. Experimentación econométrica.....</b>	<b>179</b>
5.1 Desarrollo econométrico.....	180
5.1.1 Planteamiento teórico, especificación del modelo y obtención de datos. ....	181
5.1.2 Modelado de series temporales .....	186
5.1.3 Análisis exploratorio de los datos .....	191
5.1.4 El enfoque ARDL con prueba de límites.....	191
5.1.5 Evaluación y diagnóstico del modelo .....	196
5.1.6 Interpretación de los resultados .....	200
5.1.7 Confirmación de resultados .....	201
<b>Capítulo VI. Análisis e interpretación de los resultados .....</b>	<b>204</b>
6.1 Análisis exploratorio de variables.....	204
6.2 Pruebas de raíz unitaria.....	212
6.3 Modelo ARDL preliminar y evaluación de supuestos básicos de regresión.....	217
6.4 Prueba de límites para cointegración y estimación de coeficientes de largo plazo	220
6.5 Estabilidad de los estimadores y confirmación de resultados por MCO.....	224
6.6 Discusión ¿Podemos confiar en los coeficientes obtenidos?.....	227
6.6.1 Propiedades de una función cuadrática.....	228
6.6.2 Propiedades aplicadas a la CAK.....	231
6.6.3 ¿Por qué las parábolas del ARDL de límites o el MCO no siguen la relación CO2-PIB?.....	235
6.6.4 Aplicación a la forma reducida de la CCK y modelación por ARDL sin término cuadrático .....	237
6.6.5 Discusión en torno a otros trabajos empíricos.....	249
<b>Conclusiones, implicaciones y recomendaciones.....</b>	<b>251</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>260</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>284</b>



## Relación de figuras, tablas y ecuaciones

### Índice de figuras

Figura 1. Cambios en la temperatura terrestre global observada vs cambios simulados humano-naturales y solo factores naturales, en °C de 1850 a 2019. ....	21
Figura 2. Flujos que determinan el balance energético de la tierra .....	48
Figura 3. Interacciones subyacentes del sistema climático .....	57
Figura 4 Emisiones globales de GEI por tipo de gas, 1850 - 2022 (GtCO <sub>2</sub> e).....	69
Figura 5 Participación porcentual principales GEI respecto del total, 1850 – 2022 (GtCO <sub>2</sub> e). ....	71
Figura 6 GEI por actividades económicas, 1850 – 2022 (GtCO <sub>2</sub> e).....	73
Figura 7 Emisiones de CO <sub>2</sub> mexicanas y por actividad económica, 1970 – 2022 (MtCO <sub>2</sub> ). ....	87
Figura 8. Participación de las actividades generadoras de CO <sub>2</sub> en México, 1950 a 2022 (%). ....	88
Figura 9. CO <sub>2</sub> , PIB y Consumo de energía per cápita de 1970 a 2022 (toneladas, dólares y KWh).....	89
Figura 10. Gráfico de dispersión relación CO <sub>2</sub> -PIB per cápita .....	96
Figura 11. Flujo de inversión extranjera directa, 1970 a 2022 (\$US precios corrientes)...	98
Figura 12. Consumo per cápita de energía primaria renovable en México, 1970 a 2022 (KWh). ....	100
Figura 13. Curva Ambiental de Kuznets (CAK) .....	136
Figura 14. Gráficos de variables modeladas en logaritmos naturales, 1970 a 2022.....	206
Figura 15. CUSUM y CUSUMQ .....	225
Figura 16. Gráfica de la CCK con ARDL de límites vs relación CO <sub>2</sub> -PIB.....	234
Figura 17. Gráfica de la CCK con MCO de confirmación vs relación CO <sub>2</sub> -PIB. ....	235
Figura 18. Curva CCK estimada vs relación observada CO <sub>2</sub> -PIB.....	240
Figura 19. CUSUM y CUSUMQ de coeficientes de largo plazo sin PIB cuadrático .....	249

### Índice de tablas

Tabla 1. Emisiones de GEI por sector, subsector y rama en el año 2018 (48.03 GtCO <sub>2</sub> e = 100%). ....	82
Tabla 2. Mayores países emisores de CO <sub>2</sub> acumulado de 1950 a 2022 (GtCO <sub>2</sub> ). ....	85
Tabla 3. Trabajos empíricos sobre la CAK y la PHH.....	161

Tabla 4. Descripción de datos y fuente .....	185
Tabla 5. Estadística descriptiva de las variables de estudio.....	205
Tabla 6. Resultados de las pruebas ADF y PP .....	212
Tabla 7. Resultados de la prueba de raíz unitaria de Lee y Strazicich .....	214
Tabla 8. Resultados del modelo de ECM no restringido.....	218
Tabla 9. Resultados de la prueba límites (bound test) para cointegración. ....	220
Tabla 10. Resultados de la estimación para coeficientes de largo plazo.....	222
Tabla 11. Confirmación de resultados por MCO .....	226
Tabla 12. Resultados MCO en forma reducida .....	238
Tabla 13. Resultados UECML sin PIB cuadrático.....	244
Tabla 14. Resultados de la prueba límites sin PIB cuadrático.....	245
Tabla 15. Coeficientes de largo plazo sin PIB cuadrático.....	246
Tabla 16. Coeficientes de corto plazo modelo ARDL sin PIB cuadrático.....	247

#### Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Especificación matemática del modelo.....	183
Ecuación 2. Especificación econométrica de modelo.....	183
Ecuación 3. Diferencia de una serie de tiempo .....	190
Ecuación 4. Especificación del modelo UECM.....	194
Ecuación 5. Especificación del modelo ECM .....	196
Ecuación 6. Forma general de una función cuadrática.....	228
Ecuación 7. Coordenadas del vértice de la parábola .....	229
Ecuación 8. Discriminante de la parábola .....	230
Ecuación 9. Intersecciones en el eje X de la parábola .....	230
Ecuación 10. Forma de reducida de la curva de carbono de Kuznets (CCK). ....	231
Ecuación 11. Picck, punto de inflexión de la curva de carbono de Kuznets .....	232
Ecuación 12. Discriminante de la CCK .....	232
Ecuación 13. Intersecciones de la CCK en eje del PIB .....	232
Ecuación 14. Formula matricial para vector de coeficientes por MCO .....	236
Ecuación 15. Tiempo para un PIB futuro.....	242
Ecuación 16. Función de producción agregada con energía.....	254
Ecuación 17. Función de producción Cobb-Douglas con energía (FPCDE).....	255

## Siglas y abreviaturas

**ADF:** Prueba de Raíz Unitaria Dickey-Fuller Aumentada

**ARDL Bound test:** Modelo Autoregresivo de Rezagos Distribuidos con prueba de límites

**BM:** Banco Mundial

**CAK:** Curva Ambiental de Kuznets

**CDN:** Contribución Determinada a Nivel Nacional

**CE:** Consumo de Energía Fósil

**CER:** Consumo de Energía Renovable

**CH<sub>4</sub>:** Metano

**CO<sub>2</sub>:** Dioxido de Carbono

**COP:** Conferencia de las Partes

**EI:** Instituto de Energía

**EPA:** Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos

**GEI:** Gases de efecto Invernadero

**GtCO<sub>2e</sub>:** Gigatonelada de dióxido de carbono equivalente

**IE:** Informe de Evaluación

**IED:** Inversión Extranjera Directa

**INECC:** Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

**IPCC:** Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

**KWh:** Kilovatios hora

**LN:** Logaritmo natural

**LS:** Prueba de Raíz Unitaria Lee y Strazicich

**MCO:** Mínimos Cuadrados Ordinarios

**MtCO<sub>2</sub>:** Megatonelada de dióxido de carbono

**N<sub>2</sub>O:** Óxido Nitroso

**NASA:** Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio

**OMM:** Organización Meteorológica Mundial

**ONU:** Organización de las Naciones Unidas

**PCG:** Potencial de Calentamiento Global

**PHH:** Hipótesis del Paraíso de Contaminación

**PI:** Punto de inflexión

**PIB:** Producto Interno Bruto

**PICCK:** Punto de Inflexión de la Curva de Carbono de Kuznets

**PIK:** Instituto Potsdam para la Investigación del Impacto Climático

**PP:** Prueba de Raíz Unitaria Phillips-Perron

**SEMARNAT:** Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

**SENER:** Secretaría de Energía

**TLCAN:** Tratado de Libre Comercio de América del Norte

**ZA:** Prueba de Raíz Unitaria Zivot y Andrews

## Resumen

El principal objetivo de esta tesis es determinar si la economía mexicana ha llegado al punto de inflexión de sus emisiones de CO<sub>2</sub>, así como cuantificar el impacto de largo plazo del crecimiento económico, la inversión extranjera directa, el consumo de energía fósil y el consumo de energía renovable sobre este gas de efecto invernadero. Bajo el enfoque teórico de la CAK y la PHH se aplica la metodología econométrica ARDL con prueba de límites para el periodo de 1970 a 2022. Sin embargo, el proceso reveló que esta metodología como ha sido utilizada hasta ahora en el caso de la CAK, condiciona las formas de U o U invertidas encontradas. En este contexto, se aplica el método MCO para hallar punto de inflexión de la CAK en su forma reducida y la técnica ARDL de límites para cuantificar el impacto de las variables en el largo plazo. Los resultados con este ajuste metodológico son: (i) se valida parcialmente la CAK en México debido a que las emisiones de CO<sub>2</sub> no han alcanzado el punto de inflexión, (ii) se valida débilmente la PHH debido al bajo efecto de la IED sobre las emisiones de CO<sub>2</sub>, (iii) el consumo de energía fósil tiene el mayor efecto sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> y (iv) el consumo de energía renovable no tiene un impacto significativo sobre las emisiones de CO<sub>2</sub>.

**Palabras clave:** CO<sub>2</sub> México, punto de inflexión, CAK, PHH, ARDL de límites.

## **Abstract**

The main objective of this thesis is to determine whether the Mexican economy has reached the turning point of CO<sub>2</sub> emissions, as well as to quantify the long-term impact of economic growth, foreign direct investment, fossil energy consumption and renewable energy consumption on this greenhouse gas. Under the theoretical approach of EKC and PHH, the econometric methodology ARDL with bounds testing is applied for the period 1970 to 2022. However, the process revealed that this methodology as it has been used so far in the case of CAK, conditions the inverted U- or U-shapes found. In this context, the OLS method is applied to find the turning point of the CAK in its reduced form and the ARDL bound test to quantify the impact of the variables in the long run. The results with this methodological adjustment are: (i) the CAK is partially validated in Mexico due to CO<sub>2</sub> emissions have not reached the turning point, (ii) the PHH is weakly validated due to the low effect of FDI on CO<sub>2</sub> emissions, (iii) fossil energy consumption has the largest effect on CO<sub>2</sub> emissions and (iv) renewable energy consumption does not have a significant impact on CO<sub>2</sub> emissions.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> México, turning point, CAK, PHH, ARDL bound test.

## Introducción

El cambio climático de origen humano ya está afectando a muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos en todas las regiones del planeta causando impactos adversos generalizados con pérdidas y daños hacia la naturaleza incluidas las personas. En este sentido, las comunidades vulnerables, que históricamente menos han contribuido al cambio climático actual, son las que se ven afectadas de forma desproporcionada (H. Lee, Calvin, Dasgupta, Krinner, Péan, et al., 2023). N. Stern (2008) advirtió que los costos y los riesgos totales del cambio climático equivaldrán a la pérdida de al menos 5% del producto interno bruto (PIB) mundial cada año y, tomando en cuenta una serie mayor de riesgos y repercusiones, la estimación de los daños podría elevarse a 20% o más del PIB.

Por otro lado, Greenpeace señaló que México se ubica entre los países con mayor vulnerabilidad, debido a que 15% de su territorio nacional, 68.2% de su población y 71% de su PIB se encuentran altamente expuestos al riesgo de impactos adversos directos del cambio climático, de este modo, los impactos en la economía mexicana podrían alcanzar hasta el 40% del PIB para fines de siglo. En cuanto al costo económico, al 2100, serían al menos tres veces superiores que el costo de mitigación del 50% de las emisiones en 2050, el cual se calcula entre 0.70% y 2.21% del PIB (Cárdenas, 2010).

Para enfrentar el cambio climático y sus impactos negativos, el 12 de diciembre de 2015, 196 países suscribieron el Acuerdo de París en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21). El Acuerdo tiene por objeto reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático y para ello busca mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1.5 °C con respecto a los niveles preindustriales. El Acuerdo de París se implementa en ciclos de cinco años, con acciones de los países progresivamente más ambiciosas en materia climática por lo que se espera, que cada cinco

años, los países envíen un plan nacional actualizado de acción climática conocido como Contribución Determinada a Nivel Nacional (CDN) (Naciones Unidas (ONU), 2015).

En la actualización de su CDN en 2022, México aumentó su meta de reducción de gases de efecto invernadero de 22% a 35% en 2030, como uno de sus objetivos principales. El periodo de implementación de la CDN es de 2020 a 2030. Esta meta coadyuvaría a reducir la intensidad de emisiones por unidad de PIB en alrededor de 40% entre 2013 y 2030. Además, la CDN afirma que México hará esfuerzos para que sus emisiones logren un pico lo antes posible, y se desarrollarán estudios de trayectorias de descarbonización de largo plazo (SEMARNAT & INECC, 2022).

En este contexto, esta investigación tiene el objetivo de determinar si la economía mexicana ha alcanzado el pico máximo de las emisiones de CO<sub>2</sub>, gas que en los últimos años ha representado alrededor del 70% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero en el país (Gütschow & Pflüger, 2023). Para este propósito, se utiliza el marco teórico y empírico de la curva ambiental de Kuznets (CAK). Particularmente la CAK, presenta una hipótesis consistente con el objetivo de estudio, de manera general la hipótesis postula que la relación entre degradación ambiental y crecimiento económico sigue una trayectoria en forma de U invertida, por lo tanto, existe un punto de inflexión (Pi o TP del inglés *turning point*) a partir del cual, a mayores niveles de crecimiento económico se generan cada vez menores niveles de degradación ambiental, en este caso, degradación por CO<sub>2</sub>.

Por lo tanto, determinar el “pico máximo” de las emisiones de CO<sub>2</sub> significa validar que la relación a lo largo del tiempo entre emisiones de CO<sub>2</sub> y crecimiento económico sigue una forma de U invertida en el caso de la economía mexicana. Para probar la existencia de la CAK en México, se emplea una de las pruebas que en los últimos años ha destacado por su uso en el modelado de series temporales, el modelo Autoregresivo de Rezagos Distribuidos con prueba de límites para cointegración (ARDL *bounds testing* por sus siglas



en inglés), sin embargo, se encontró que la forma en que la técnica ARDL con prueba de límites ha sido utilizado hasta el momento, condiciona en sentido matemático estricto la existencia de curvas en forma de U o U invertidas.

Es aquí donde tiene lugar nuestra principal contribución, proponemos una combinación metodológica MCO-ARDL con prueba de límites que consiste en la estimación en forma reducida de los coeficientes del PIB (lineal y cuadrático). Si se confirma la significancia y el signo de coeficientes que sugieran inicialmente la forma de una U invertida o de U normal, entonces se deben estimar los elementos fundamentales de una función cuadrática que permitirán trazar la parábola correspondiente, estos elementos son, las intersecciones en el eje del crecimiento económico (que hemos denominado como “PIBa” y “PIBz”) y el vértice de la parábola (que hemos denominado como “Picck”).

El vértice de la parábola es el punto de inflexión o pico máximo de las emisiones de CO<sub>2</sub> que estamos buscando. Para validar gráficamente que la relación CO<sub>2</sub>-PIB es una U invertida, entonces, el conjunto de datos observados de esta relación deberá cruzar el vértice de la parábola trazada. De manera analítica, la validación quedaría demostrada cuando los valores de PIB observados sean mayores al valor del PIB de inflexión y cuando los valores observados de CO<sub>2</sub> sean menores al valor del CO<sub>2</sub> de inflexión, manteniéndose este comportamiento cada vez más en el futuro.

Complementariamente se propone estimar un ARDL con prueba límites que permita verificar el ajuste cuadrático (si fuera el caso) en el largo plazo en presencia de otros regresores subyacentes a la relación CO<sub>2</sub>-PIB pero sin incluir el término al cuadrado del PIB ya que este enfoque tiene la capacidad de modelar tanto la dinámica de corto plazo como de largo plazo a partir de la misma serie temporal por lo que el resultado del coeficiente de corto plazo y el coeficiente de largo plazo del PIB pueden comprobar el ajuste

a lo largo del tiempo, por el contrario, incluir un término cuadrático condicionaría los coeficientes de los regresores y podría llevar a conclusiones sesgadas.

Pues bien, el resto de este trabajo se organiza como sigue. El capítulo uno, revisa los elementos clave de esta investigación que incluye, el planteamiento del problema, preguntas de investigación, objetivos, hipótesis, variables y justificación.

El capítulo dos, revisa la literatura teórica y empírica relacionada a la curva ambiental de Kuznets y la hipótesis del paraíso de contaminación.

El capítulo tres, muestra los fundamentos del cambio climático, así como su relación con las actividades económicas.

El capítulo cuatro, desarrolla la metodología del ARDL con prueba de límites, en la sección de discusión se muestra el desarrollo de nuestro ajuste metodológico, primero se demuestra el sesgo de los coeficientes de la aplicación ARDL tradicional y posteriormente se desarrolla la combinación metodológica MCO-ARDL con las expresiones matemáticas requeridas, por último, se finaliza esta tesis con las conclusiones, implicaciones y recomendaciones correspondientes y se agregan las referencias.

## Capítulo I. Fundamentos de la investigación científica

*A mediados del siglo I.V. a.C. aproximadamente, Aristóteles sostenía la teoría de la Tierra esférica en el centro del universo usando pruebas lógicas y matemáticas, además de datos observacionales, como la variación de la posición de las estrellas en distintos lugares y la sombra redonda de la Tierra proyectada en los eclipses a luna, proponiendo con ello la existencia de un Cosmos esférico y finito (Aristóteles, 350 a. C.; Hawking, 1988).*

*Sin embargo, uno de los problemas principales en el sistema aristotélico, era que no podía explicar los cambios en el tamaño aparente de los planetas causados por un cambio en la distancia. Este problema fue tratado por el astrónomo alejandrino, Claudio Ptolomeo en el siglo II d. C. Su explicación, que concluiría en el modelo geocéntrico del universo sería aceptada durante más de 1 400 años como la visión cosmológica correcta por astrónomos de Europa y Medio Oriente.*

### 1.1 Elementos clave de esta investigación

¿Por qué surge esta investigación? El objetivo de este capítulo es identificar la problemática a partir de la cual se desarrolla esta investigación, así como los componentes clave del método científico que la estructuran, los cuales son:

- Planteamiento del problema.
- Preguntas de investigación.
- Objetivos de investigación.
- Hipótesis.
- Identificación de variables.
- Justificación

### 1.1.1 Planteamiento del problema

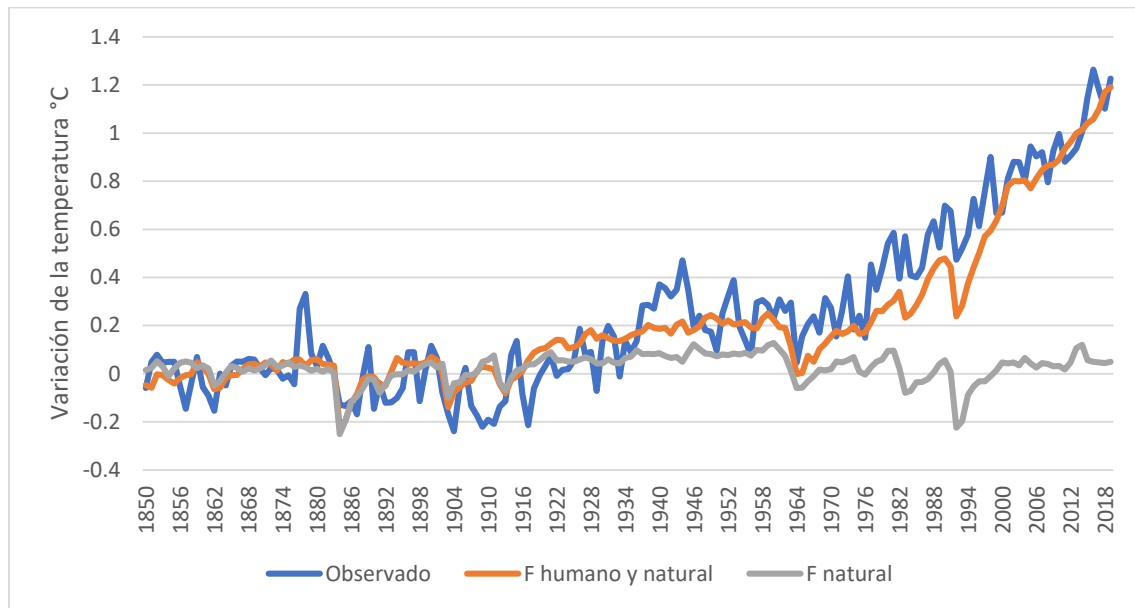
En el año 2021, El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) señaló en su Sexto Informe de Evaluación (IE6), “Bases físicas”, que el calentamiento de la atmósfera, el océano y la tierra debido a la influencia humana es inequívoco, con esta influencia, se ha causado un calentamiento del clima a un ritmo no visto desde hace, al menos, 2 000 años (Masson-Delmotte et al., 2021).

Como una de sus pruebas más recientes, comparó los cambios de la temperatura media en la superficie global con los cambios simulados de modelos climáticos avanzados derivados de un proyecto mundial climático conocido como “Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados en su sexta fase” (CMIP6), realizado por el Programa Mundial de Investigación del Clima (WCRP por sus siglas en inglés), con este tipo modelos es posible conocer las variaciones de la temperatura media global real observada y a su vez compararla con las variaciones causadas por factores naturales pero también con las variaciones por causas humanas y naturales combinadas.

Los resultados de esta modelación se pueden apreciar en la reconstrucción de la figura 1. La línea azul representa los cambios reales observados de la temperatura global en superficie desde 1850 hasta el año 2019, es decir, son las variaciones anuales en grados Celsius (°C) de los últimos 169 años con respecto al promedio anual del periodo de 1850 a 1900 (considerado el nivel preindustrial para el IPCC).

Las líneas naranja y gris representan las simulaciones de los modelos climáticos del CMIP6 correspondientes a la respuesta de la temperatura de las fuerzas impulsoras humano-naturales combinadas (línea naranja) y solo a las fuerzas impulsoras naturales (actividad solar y volcánica, línea gris).

Figura 1. Cambios en la temperatura terrestre global observada vs cambios simulados humano-naturales y solo factores naturales, en °C de 1850 a 2019.



Fuente: Reconstrucción gráfica con datos de Gillett et al. (2023).

Se observa con claridad que desde 1850 hasta alrededor de 1935 los cambios en la temperatura global oscilaron apenas arriba de los 0 °C, incluso se registraron variaciones negativas lo que indica temperaturas más bajas al promedio de los niveles preindustriales, en ese tiempo. Tanto la simulación de factores humano-naturales y solamente naturales siguieron trayectorias parecidas, sin embargo, alrededor de 1935 la temperatura superó los .2 °C y a partir de la década de 1970 la temperatura ha aumentado continuamente llegando a superar el 1.2 °C en los años 2016 y 2019, registrando 1.26 °C y 1.22 °C respectivamente.

En cuanto a los datos arrojados por el CMIP6 es notable que los aumentos de temperatura pueden ser explicados por la contribución humana mezclada con las causas naturales, ya que, si solamente se tomara en cuenta los factores naturales, los cambios promedio de temperatura seguirían oscilando alrededor de 0 °C en lugar de una tendencia al alza, tal y

como lo muestra el cambio de dirección de la línea naranja respecto de la línea gris producido poco antes de los años de 1970.

El IPCC enfatiza que, cada una de las últimas cuatro décadas ha sido sucesivamente más cálida que cualquier década anterior desde 1850. La temperatura global en superficie de las dos primeras décadas del siglo XXI (2001 a 2020) fue 0.99 °C más alta que en el período 1850 a 1900. La temperatura global en superficie fue 1.09 °C más alta en 2011 a 2020 que en 1850 a 1900, y los aumentos fueron mayores sobre la tierra que sobre el océano.

En este sentido, el IPCC afirma que el incremento estimado de la temperatura global en superficie desde el Quinto Informe de Evaluación (IE5) se debe principalmente a un mayor calentamiento a partir de 2003 a 2012 (Masson-Delmotte et al., 2021).

Adicionalmente, en una nueva publicación de 2023 correspondiente al informe de síntesis del IE6, el Panel ha concluido que, inequívocamente, las actividades humanas, principalmente a través de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), han causado el calentamiento global, por ello, el cambio climático causado por el hombre ya está afectando a muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos en todas las regiones del planeta provocando efectos adversos generalizados, pérdidas y daños en la naturaleza y las personas (H. Lee, Calvin, Dasgupta, Krinner, Park, et al., 2023).

Ahora bien, ¿Qué es el cambio climático y cuál es su problemática?

De acuerdo con el IPCC, el cambio climático hace referencia a:

Una variación del estado del clima identificable en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante períodos prolongados, generalmente décadas o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos, tales como modulaciones de

los ciclos solares, erupciones volcánicas y cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso de la tierra. (IPCC, 2018, p. 544)

En otras palabras, el cambio o cambios climáticos se pueden comprender también, como el conjunto de alteraciones que ha sufrido el sistema climático del planeta a escala nacional y mundial desde la época preindustrial, causado por actividades humanas principalmente por el consumo de combustibles fósiles, la agricultura, y cambios en el uso de las tierras, causas que aumentaron las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero y aerosoles desde esa época (Watson et al., 2001).

Los cambios o alteraciones a los que hacer referencia el IPCC medidos por indicadores de concentración, meteorológicos, físicos-biológicos y económicos (Watson et al., 2001, pp. 5–6), son:

Cambios de concentración.

- Concentración atmosférica de CO<sub>2</sub>
- Intercambio en la biosfera terrestre de CO<sub>2</sub>
- Concentración atmosférica de CH<sub>4</sub>
- Concentración atmosférica de N<sub>2</sub>O
- Concentración troposférica de O<sub>3</sub>
- Concentración estratosférica del O<sub>3</sub>
- Concentraciones atmosféricas de HFC, PFC, y SF<sub>6</sub>.

Cambios meteorológicos.

- Temperatura media mundial de la superficie
- Temperatura en la superficie del Hemisferio Norte
- Temperatura diurna de la superficie

- Días calurosos/índice de calor
- Días de frío/heladas
- Precipitaciones continentales
- Precipitaciones fuertes
- Frecuencia e intensidad de las sequías

#### Cambios físicos y biológicos.

- Media mundial del nivel del mar
- Duración de las capas de hielo en ríos y lagos
- Extensión y espesor del hielo marino en el Ártico
- Glaciares no polares
- Capa de nieve y permafrost
- Fenómenos asociados con El Niño
- Época de crecimiento
- Área de distribución de plantas y animales
- Cría, floración y migración
- Decoloración de arrecifes de coral

#### Cambios económicos.

- Pérdidas económicas relacionadas con fenómenos meteorológicos

En este contexto, son estos cambios observados en los climas regionales inducidos por las actividades humanas, los que han afectado a muchos sistemas biológicos y físicos, por consecuencia, también los sistemas sociales y económicos estarían siendo afectados. Se resumen a continuación los efectos del cambio climático en la salud humana, los ecosistemas, la producción de alimentos, los recursos hídricos, las pequeñas islas y zonas costeras bajas, y las actividades mercantiles agregadas (Watson et al., 2001, pp. 71–79):



## Salud humana

En general, se prevé que el cambio climático aumente los riesgos para la salud humana, sobre todo para las poblaciones más pobres de los países tropicales y subtropicales.

El cambio climático puede afectar a la salud humana de varias maneras, incluidos los efectos directos (menos problemas relacionados con el frío en los países cálidos, pero más problemas debidos al aumento del calor; pérdida de vidas por inundaciones y tormentas) y efectos indirectos manifestados a través de cambios en la gama de organismos vectores que transmiten enfermedades infecciosas (por ejemplo, enfermedades transmitidas por mosquitos), patógenos transmitidos por el agua, calidad del agua y del aire, disponibilidad y calidad de los alimentos (por ejemplo, menor contenido proteínico de ciertos cereales), desplazamiento de poblaciones y desestabilización económica.

## Biodiversidad y productividad de los sistemas ecológicos

Es probable que la diversidad de los sistemas ecológicos se vea afectada por el cambio climático y la subida del nivel del mar, con un mayor riesgo de extinción de determinadas especies vulnerables.

Se prevé que aumenten las principales perturbaciones de los ecosistemas como consecuencia de factores como los incendios, las sequías, los parásitos, las invasiones de especies, las tormentas y el blanqueamiento de los corales. Los problemas causados por el cambio climático, cuando se combinan con otros problemas a los que se enfrentan los sistemas ecológicos (como la conversión y degradación del suelo, los cultivos y la contaminación), pueden causar daños muy importantes, incluso la pérdida total de ciertos ecosistemas únicos y la extinción de especies amenazadas.

Además, la productividad de los sistemas ecológicos es muy sensible al cambio climático, y las proyecciones de cambios en la productividad incluyen tanto aumentos como

disminuciones. El aumento de las concentraciones de CO<sub>2</sub> podría incrementar la productividad primaria neta (fertilización por CO<sub>2</sub>) y la productividad neta de los ecosistemas en la mayoría de los sistemas vegetales, lo que conduciría a una acumulación de carbono en la vegetación y los suelos a lo largo del tiempo.

El cambio climático podría aumentar o reducir los efectos directos del CO<sub>2</sub> sobre la productividad, dependiendo del tipo de vegetación, de la región y del escenario de cambio climático. Los ecosistemas terrestres actúan actualmente como sumideros de carbono, lo que podría disminuir a medida que aumente el calentamiento hacia finales del siglo XXI.

Se espera que la absorción disminuya a medida que los bosques maduren, los efectos de la fertilización se saturen y la descomposición alcance al crecimiento, y quizás también a medida que el clima cambie en regímenes desestabilizadores (por ejemplo, incendios e invasiones de insectos).

## Agricultura

Las simulaciones de cultivos de cereales indican que el rendimiento potencial aumenta con pequeños incrementos de temperatura en algunas zonas templadas, pero disminuye con grandes cambios. En la mayoría de las zonas tropicales y subtropicales, se espera que el rendimiento de los cultivos disminuya con la mayoría de los aumentos de temperatura previstos.

En las latitudes medias, las simulaciones de cultivos indican que las respuestas al calentamiento de menos de unos pocos grados centígrados y a los aumentos asociados de las concentraciones de CO<sub>2</sub> son generalmente positivas, y que las respuestas a un calentamiento mayor son generalmente negativas. En las zonas agrícolas tropicales, evaluaciones similares indican que los rendimientos de algunos cultivos pueden disminuir

con un pequeño aumento de la temperatura, porque están cerca del límite superior de su tolerancia a la temperatura.

Si las precipitaciones también disminuyen significativamente en los sistemas tropicales y subtropicales secos y húmedos, la caída del rendimiento de los cultivos será aún más pronunciada. Las evaluaciones que incluyen adaptaciones agronómicas autónomas (como cambios en la época de siembra y en las variedades de cultivo) tienden a predecir rendimientos menos afectados por el cambio climático que en los escenarios que no incluyen tales adaptaciones. Se calcula que un aumento de tan sólo unos pocos grados centígrados provocaría una subida de los precios mundiales de los alimentos, lo que podría aumentar el riesgo de hambruna entre las poblaciones vulnerables.

## Agua

El cambio climático previsto podría agravar en gran medida los problemas de escasez y calidad del agua en muchas partes del mundo que ya sufren escasez, pero aliviar estos problemas en otras. La demanda de agua está aumentando en todo el mundo debido al crecimiento demográfico y al desarrollo económico, pero está disminuyendo en algunos países debido a un uso más eficiente del agua. Se prevé que el cambio climático reduzca los caudales de aguas superficiales y la recarga en muchas partes del mundo, pero también podría aumentarlos en otras.

La magnitud de los cambios entre los distintos escenarios se debe en parte a las diferencias en los patrones de dosificación previstos (y en particular a su intensidad), y en parte a las diferencias en las proyecciones de evaporación. Entre varios cientos de millones y varios miles de millones de personas experimentarán una reducción del suministro de agua del 10% o más de aquí a 2050, y se prevé que el cambio climático corresponda a un aumento del 1% de las emisiones de CO<sub>2</sub> al año.

Es probable que la calidad del agua dulce se deteriore en general a medida que aumente la temperatura del agua, aunque en algunas regiones esto puede verse compensado por el aumento del caudal. Es probable que los efectos del cambio climático sobre la escasez y la calidad del agua, así como sobre la frecuencia e intensidad de las sequías y las inundaciones, intensifiquen los retos de la gestión del agua y las inundaciones.

#### Islas pequeñas y zonas costeras bajas

Es probable que los habitantes de las islas pequeñas y/o de las zonas costeras bajas sufran graves consecuencias sociales y económicas por la subida del nivel del mar y las repentinas mareas de tempestad. Muchos asentamientos se verán afectados por el aumento de la erosión costera y las inundaciones, y millones de personas que viven en deltas, zonas costeras bajas o en islas pequeñas pueden verse desplazadas y perder infraestructuras y/o incurrir en esfuerzos y costes considerables para proteger sus zonas costeras vulnerables.

#### Efectos en el mercado

En muchos países en desarrollo, los efectos globales sobre el sector del mercado, medidos por los cambios en el producto interno bruto (PIB), se espera que sean negativos en todos los escenarios basados en un aumento de la temperatura media global, y en los países desarrollados se espera que los efectos sean mixtos en los escenarios basados en un aumento de la temperatura de sólo unos pocos grados centígrados y negativos en los escenarios basados en un mayor calentamiento. Los efectos del cambio climático tendrán consecuencias para el mercado en términos de cambios en la cantidad, la calidad y el precio de los alimentos, las fibras, el agua y otros bienes y servicios.

Otros impactos del cambio climático en el mercado pueden ser los cambios en la demanda de energía, el suministro de energía hidroeléctrica, el transporte, el turismo y la construcción, los daños a la propiedad y las pérdidas de seguros debido a fenómenos

meteorológicos extremos, la pérdida de tierras costeras debido a la subida del nivel del mar, las decisiones de asentamiento y reasentamiento y las iniciativas de urbanización, así como el suministro de recursos y los costes de adaptación al cambio climático.

Las estimaciones de los impactos netos en el mercado que ofrecen los pocos estudios publicados hasta la fecha, que combinan diferentes sectores y agregan datos a escala nacional y regional, indican pérdidas en la mayoría de los países y regiones en desarrollo estudiados.

#### México en el contexto del cambio climático

En el año 2010, Greenpeace realizó un informe completo del estado del cambio climático en México y estas fueron algunas de sus conclusiones más relevantes (Cárdenas, 2010, pp. 66–68):

- Prácticamente ningún sector de la economía, la población o la región de México es inmune a los efectos del cambio climático.
- México es uno de los países más vulnerables, con el 15% de su territorio nacional, el 68.2% de su población y el 71% de su PIB altamente expuestos al riesgo de los efectos negativos directos del cambio climático.
- Las proyecciones muestran que entre el 20% y el 46% de la superficie de bosques de coníferas y encinos se verá seriamente afectada entre 2020 y 2050. Alrededor del 63% de la República Mexicana se verá afectada, y las comunidades que sufrirán los mayores impactos climáticos serán los matorrales y pastizales, con alrededor del 77% de su cobertura.
- El cambio climático tenderá a exacerbar la crisis del agua, debido (entre otros factores) a la reducción de las lluvias, lo que implicará que más regiones hidrológico-

administrativas experimentarán problemas intermitentes de escasez de agua. En el caso extremo del Valle de México, el problema podría volverse insostenible.

- Los fenómenos hidrometeorológicos de 1998, 2003, 2005 y 2007 en las regiones Altos, Sierra, Costa y Soconusco de Chiapas han demostrado que los daños ambientales, sanitarios, económicos, culturales y sociales están latentes entre los diferentes grupos de asentamientos humanos de muchas zonas rurales del país.
- En lo que se refiere a la agricultura, se puede concluir que la pérdida económica de la producción agrícola puede oscilar entre 16 mil y 22 mil millones de pesos. Es decir, si consideramos que el valor de la producción de los principales cultivos como caña de azúcar, frijol, maíz, café, trigo y naranja es de alrededor de 39 mil millones de dólares, la pérdida de producción por el cambio climático es de entre 42% y 57%.
- Entre los impactos del cambio climático en los ecosistemas marinos de nuestro país, es significativo el efecto de la acidificación del agua de mar en los arrecifes de coral, ecosistema que produce muchos servicios ambientales y del que dependen grandes regiones costeras, particularmente la costa maya del Caribe mexicano. La acidificación debida al aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> tendrá efectos devastadores en los corales.
- Ciertas enfermedades respiratorias y alergias ya han empeorado como consecuencia del cambio climático y, por tanto, medioambiental. Los efectos sobre la calidad del aire, especialmente en las zonas urbanas, son de gran interés y preocupación, ya que el aumento de las temperaturas puede agravar la contaminación por ozono. La contaminación por ozono se ha asociado a un aumento de los ingresos hospitalarios por infecciones de las vías respiratorias inferiores y asma infantil.
- Debido al aumento de la temperatura de la superficie del mar, de la temperatura mínima y de las precipitaciones, los ciclos de transmisión del dengue aumentarán

en ciertas regiones del Golfo de México. En el norte del país, existe una relación significativa entre la temperatura y la mortalidad por estrés térmico.

- Una de las contradicciones estructurales más graves y profundas del sistema económico actual es, sin duda, la que enfrenta el equilibrio ambiental necesario para la vida en nuestro planeta con la continua y creciente transformación y degradación de las condiciones ambientales debido a las prácticas de producción y consumo que prevalecen en el mundo actual. El cambio climático es uno de los principales procesos derivados de ello, cuya magnitud apenas podemos empezar a vislumbrar.
- El impacto en la economía mexicana podría alcanzar el 40% del PIB a finales de siglo. Los costes económicos para 2100 serán al menos tres veces superiores a los costes de mitigar el 50% de nuestras emisiones para 2050, estimados entre el 0.70% y el 2.21% del PIB. El riesgo de proliferación de catástrofes naturales como inundaciones u olas de calor y el aumento de los grandes incendios forestales llevan asociados, además de los impactos medioambientales, graves consecuencias económicas, así como la posibilidad de tener que hacer frente a daños en la salud de las personas e incluso el riesgo de pérdida de vidas humanas.
- Si nos fijamos en las demandas que están detrás de la mayoría de los conflictos medioambientales de los últimos tres años (tenencia de la tierra, 34%; defensa de la biodiversidad, 17%; defensa de los bosques y selvas, 14%; contra la contaminación generada por actores privados, 13% ; denuncia de actividades mineras y petroleras contaminantes, 10%; defensa del agua y contra su privatización, 10%), no debemos dudar en considerar a las comunidades como el verdadero rostro de la lucha contra el cambio climático, como los verdaderos defensores del planeta, los verdaderos ecologistas de hoy.
- La sociedad y los ecosistemas también son cada vez más vulnerables. Los riesgos climáticos, combinados con el aumento de la vulnerabilidad, son la clave para

entender algunas de las recientes catástrofes. Los efectos del fenómeno de El Niño ilustran por sí solos la incapacidad de hacer frente a condiciones meteorológicas anormales. Del mismo modo, las sequías, las lluvias torrenciales y los huracanes son fenómenos a los que México tiene que hacer frente de forma recurrente, generando riesgos.

- El tema de la adaptación como medio para reducir la vulnerabilidad de la sociedad ante el cambio climático requiere del desarrollo de capacidades en diversas áreas, particularmente científicas y técnicas. Requiere el desarrollo de nuevas instituciones y nuevas relaciones entre la academia, el gobierno y la sociedad.

#### El acuerdo de París

Para abordar el cambio climático y sus impactos negativos, los líderes mundiales en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21) llevada a cabo en París, realizaron un avance el 12 de diciembre de 2015 con la firma del Acuerdo de París.

El acuerdo establece objetivos a largo plazo para guiar a todas las naciones: reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero para limitar el aumento de la temperatura global este siglo a 2 °C y esforzarse por limitar el aumento a poco más de 1,5 °C; revisar los compromisos de los países cada cinco años; y proporcionar financiación a los países en desarrollo para mitigar el cambio climático, aumentar la resiliencia y mejorar su capacidad de adaptación a los efectos del cambio climático.

El acuerdo es un tratado internacional jurídicamente vinculante que entró en vigor el 4 de noviembre de 2016. Actualmente, 194 partes (193 países más la Unión Europea) han firmado el Acuerdo de París. El Acuerdo incluye compromisos de todos los países para reducir sus emisiones y trabajar juntos para adaptarse a los impactos del cambio climático, así como llamamientos para que estos países aumenten sus compromisos con el tiempo.



El Acuerdo ofrece a los países desarrollados la posibilidad de ayudar a las naciones en desarrollo a mitigar el cambio climático y adaptarse a él, creando un marco para el seguimiento y la notificación transparentes de los objetivos climáticos de estos países. El Acuerdo de París proporciona un marco duradero para guiar el esfuerzo mundial durante las próximas décadas. Marca el inicio de un avance hacia un mundo sin emisiones (ONU, 2024).

¿En qué consiste?

El Acuerdo de París se aplica en ciclos de cinco años, en los que los países adoptan medidas climáticas progresivamente más ambiciosas. Cada cinco años, los países deben presentar un plan nacional de acción por el clima actualizado, conocido como Contribución Determinada a Nivel Nacional (CDN o NDC, por sus siglas en inglés). En sus CDN, los países comunican las medidas que adoptarán para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero con el fin de cumplir los objetivos del Acuerdo de París. En estas NDC, los países también comunican las medidas que tomarán para aumentar la resiliencia necesaria para adaptarse a los impactos del aumento de las temperaturas.

Para proporcionar un mejor marco a los esfuerzos por alcanzar el objetivo a largo plazo, el Acuerdo de París invita a los países a formular y presentar estrategias a largo plazo. A diferencia de las CDN, estas estrategias no son obligatorias. La aplicación del Acuerdo de París requiere una transformación económica y social, basada en los mejores conocimientos científicos disponibles. El Acuerdo de París funciona con un ciclo de cinco años de acción climática cada vez más ambiciosa por parte de los países. En 2020, los países presentaron sus planes de acción climática en sus respectivas CDNs.

Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional

En sus Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional, los países comunican las medidas que adoptarán para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero con el fin de cumplir los objetivos del Acuerdo de París. En estas contribuciones, los países también comunican las medidas que adoptarán para aumentar la resiliencia y adaptarse a los efectos del aumento de las temperaturas (*El Acuerdo de París | CMNUCC, 2024*).

### Estrategias a largo plazo

Las estrategias de desarrollo a largo plazo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero constituyen el horizonte a largo plazo de las contribuciones determinadas a nivel nacional, aunque, a diferencia de éstas, las estrategias a largo plazo no son obligatorias. Sin embargo, sitúan las contribuciones determinadas a nivel nacional en el contexto de la planificación a largo plazo y las prioridades de desarrollo de los países, proporcionando una visión y una dirección para el desarrollo futuro. El Acuerdo de París proporciona un marco para el apoyo financiero, técnico y de capacitación a los países que lo necesiten.

### Financiación

El Acuerdo de París reafirma que los países desarrollados deben tomar la iniciativa a la hora de proporcionar ayuda financiera a los países más pobres y vulnerables, al tiempo que anima a otras Partes a realizar contribuciones voluntarias por primera vez. La financiación climática es necesaria para la mitigación, ya que se requieren inversiones a gran escala para reducir significativamente las emisiones. La financiación climática es igualmente importante para la adaptación, ya que se necesitan considerables recursos financieros para adaptarse a los efectos adversos y reducir los impactos del cambio climático.

### Tecnología

El Acuerdo de París evoca la visión de realizar plenamente el desarrollo y la transferencia para mejorar la resistencia al cambio climático y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Establece un marco tecnológico para proporcionar orientación general al Mecanismo Tecnológico. El Mecanismo Tecnológico acelera el desarrollo y la transferencia de tecnología a través de sus departamentos de política y ejecución.

#### Desarrollo de capacidades

No todos los países en desarrollo tienen capacidad suficiente para hacer frente a los numerosos retos que plantea el cambio climático. Por ello, el Acuerdo de París hace especial hincapié en la creación de capacidad relacionada con el clima en los países en desarrollo, y se pide a todos los países desarrollados que aumenten su apoyo a las medidas de creación de capacidad en los países menos adelantados.

#### La contribución nacionalmente determinada de México

En 2002, México reafirmó su compromiso con el Acuerdo de París y presentó una contribución nacional determinada actualizada con una mayor ambición climática. El incremento en la meta nacional de mitigación de gases de efecto invernadero responde a un llamado de solidaridad y responsabilidad internacional, en el que todos los países deben presentar compromisos renovados y fortalecidos para hacer frente a la crisis climática global. Esta crisis requiere de un cambio profundo en el modelo económico dominante que ha destruido la naturaleza y puesto el lucro por encima del hombre (SEMARNAT & INECC, 2022).

La CDN de México incluye compromisos de mitigación y adaptación más ambiciosos. Los objetivos de mitigación de México y su mayor ambición implican acciones en toda la economía nacional: energía, transporte, gestión de residuos, sector residencial y comercial,

uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura; así como en la industria, la agricultura y la ganadería, y en el sector del petróleo y el gas.

#### Componente de mitigación

La contribución determinada a nivel nacional en materia de mitigación con un mayor nivel de ambición establece los siguientes objetivos: México incrementa su meta de reducción de GEI de 22% a 35% en 2030, respecto a su línea base, con una contribución de recursos nacionales de al menos 30% y 5% con cooperación internacional y financiamiento otorgado para energías limpias.

Bajo ciertas condiciones, México puede aumentar su meta para 2030 a 40% de su línea base de 2030 si se fortalece el financiamiento internacional, la innovación y la transferencia de tecnología, y si otros países, principalmente los mayores emisores, hacen esfuerzos para igualar las metas más ambiciosas del Acuerdo de París. Por último, se ha ratificado el objetivo de reducir las emisiones de carbono negro en un 51% de forma incondicional para 2030 y en un 70% de forma condicional para 2030.

El escenario de referencia proyectado hasta 2030, sin intervención de políticas de mitigación, se ha cuantificado en 991 megatoneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (MtCO<sub>2</sub>e) como punto de referencia para 2030. Cabe señalar que este punto de referencia es un 1,8% superior al establecido en 2015 en la “iCDN” debido a las mejoras metodológicas derivadas de la actualización del inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero, que se actualizó utilizando los métodos de 2006 del IPCC y su perfeccionamiento de 2019.

La aplicación de las mejoras metodológicas permite respaldar los objetivos nacionales utilizando la mejor información científica disponible. La reducción de las emisiones en un 35% para 2030 implica una reducción de 347 MtCO<sub>2</sub>e en 2030, mientras que el

cumplimiento de los compromisos condicionales representa 397 MtCO<sub>2</sub>e. El periodo de implementación de la NDC va de 2020 a 2030 y tiene en cuenta las políticas implementadas a partir de 2013, tras la publicación de la Ley General de Cambio Climático mexicana.

Este objetivo contribuiría a reducir la intensidad de las emisiones por unidad de producto interior bruto en torno a un 40% entre 2013 y 2030. Además, se afirma que México se esforzará por alcanzar el pico de emisiones lo antes posible y que se elaborarán estudios sobre la trayectoria de descarbonización a largo plazo (SEMARNAT & INECC, 2022).

### 1.1.2 Preguntas de investigación

En el marco de los compromisos internacionales en la lucha contra el cambio climático que ha derivado en la reciente actualización de la CDN, dónde México se ha comprometido a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 35% para el año 2030, y, además, hacer esfuerzos para que sus emisiones logren un pico lo antes posible al tiempo que desarrolla estudios de trayectorias de descarbonización de largo plazo, todo ello sobre la base de “un cambio profundo en el modelo económico imperante” (SEMARNAT & INECC, 2022, p. 9). Esta investigación pregunta:

1. ¿Cuál es la relación actual de las emisiones de CO<sub>2</sub> respecto del crecimiento económico en México?

Además, dada la necesidad de estudios de largo plazo que arrojen luz sobre la trayectoria de las emisiones de CO<sub>2</sub> en presencia de variables económicas estratégicas para el país, se pregunta:

2. ¿Cuál es el impacto de largo plazo del crecimiento económico, la inversión extranjera directa, el consumo de energía fósil y el consumo energía renovable sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> en México?

Considerando, la distinta naturaleza y complejidad que tiene los gases de efecto invernadero sobre el cambio climático hace necesario contar con estudios rigurosos por tipo de gas, por lo tanto, este trabajo delimita y concentra su estudio en las emisiones de CO<sub>2</sub> al ser el gas de efecto invernadero más abundante sobre la atmósfera y el que, en el país ha representado alrededor del 70% del total de las emisiones en los últimos años (Gütschow et al. (2016); Gütschow & Pflüger (2023)).

### 1.1.3 Objetivos de la investigación

#### General

El objetivo general de esta investigación a partir de la pregunta 1, es:

1. Determinar si la economía mexicana se encuentra en un estado de desvinculación de las emisiones de CO<sub>2</sub> en relación con el crecimiento económico o por el contrario sigue cuantitativamente otro tipo de relación en el que el avance del crecimiento económico genere mayores cantidades de CO<sub>2</sub>.

En relación a la pregunta 2 que busca conocer el efecto de largo plazo de la inversión extranjera directa y el consumo de energía tanto fósil como renovable en las emisiones de CO<sub>2</sub> en México, se busca:

1. Cuantificar el impacto de largo plazo del crecimiento económico, la inversión extranjera directa, el consumo de energía fósil y el consumo de energía renovable en las emisiones de CO<sub>2</sub> de México.

### 1.1.4 Hipótesis

Para responder a las preguntas de investigación y cumplir con los objetivos planteados, esta investigación adopta el enfoque teórico de la Curva Ambiental de Kuznets (CAK), la cual postula que la relación entre el crecimiento económico y degradación ambiental, en

este caso por emisiones de CO<sub>2</sub>, sigue una trayectoria en forma U invertida (Grossman & Krueger, 1991). Bajo este enfoque, la hipótesis para la primera pregunta es:

1. La trayectoria de las emisiones de CO<sub>2</sub> respecto al crecimiento económico en México corresponde a la etapa dominada por el efecto escala/composición/técnico de la CAK, con un punto de inflexión alcanzado/por alcanzarse.

Respecto a la pregunta 2, específicamente para el estudio de la variable de inversión extranjera directa relacionada con las emisiones de CO<sub>2</sub>, este trabajo emplea el enfoque conocido como hipótesis del paraíso de contaminación (PHH por sus siglas en inglés).

La PHH tiene dos posturas teóricas generales, la primera sostiene que las empresas multinacionales intensivas en degradación abandonan sus lugares de origen debido a los altos costos de cumplimiento de la normativa ambiental y trasladan su producción a países, donde las normativas medioambientales son menos estrictas ocasionando una mayor degradación del ambiente. En otras palabras, los países anfitriones son un paraíso de contaminación para las industrias intensivas en degradación (Gill et al., 2018).

La segunda postura argumenta por el contrario que las empresas multinacionales trasladan junto con su producción tecnología más eficiente y mejores prácticas que contribuyen a la mitigación de la degradación ambiental. En otras palabras, las empresas multinacionales generan un “halo” de contaminación en los países anfitriones. Bajo este enfoque la hipótesis a la segunda pregunta de investigación se plantea como:

2. Las inversiones extranjeras directas generan un paraíso/halo de degradación ambiental vía el incremento/disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> en México.

Las hipótesis para las variables consumo de energía y consumo de energía renovable se extraen del mismo enfoque teórico de la CAK, por lo cual dependiendo de la etapa en la que se encuentre la trayectoria del CO<sub>2</sub> respecto del crecimiento económico podrán ser:

3. El consumo de energía fósil, tiene un mayor/menor impacto de largo plazo sobre el aumento de emisiones de CO<sub>2</sub> en México.
4. El consumo de energía renovable, no tiene un impacto/tiene un impacto de mitigación de largo plazo sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> en México.

#### 1.1.5 Identificación de variables

Variable dependiente:

- Emisiones de CO<sub>2</sub>

Variables independientes:

- Crecimiento económico
- Inversión extranjera directa
- Consumo de energía fósil
- Consumo de energía renovable

#### 1.1.6 Justificación

Determinar cuál es la relación existente entre las emisiones de CO<sub>2</sub>-crecimiento económico, el punto de inflexión y el punto de cero emisiones contribuye directamente con una evaluación sobre el compromiso de reducción del 35% de las emisiones de gases de efecto invernadero en 2030, meta con la que se comprometieron también esfuerzos para que las emisiones mexicanas logren un pico lo antes posible. Lo anterior, derivado de la Contribución Determinada a Nivel Nacional (CDN) actualizada en 2022 establecida por México en el marco del Acuerdo de París que busca limitar la temperatura media global a 1.5 °C y por debajo de los 2 °C como una medida fundamental en la lucha contra el cambio climático global.



Además, conocer el impacto de largo plazo del crecimiento económico, las inversiones extranjeras directas, el consumo de energía fósil y el consumo de energía renovable, puede ayudar a la correspondiente formulación estratégica de políticas de carácter público en materia económico-ambiental que busquen el bienestar de la población mexicana, sobretodo, de aquellos habitantes que por sus características demográficas y económico-sociales son los más propensos a los riesgos originados por los efectos de los cambios climáticos a nivel global y regional.

Este trabajo aporta elementos del campo de las ciencias climáticas hacia el campo de las ciencias económicas y viceversa, que contribuyen a la construcción del marco de conocimientos necesarios para entender las relaciones existentes en torno al fenómeno del cambio climático, fenómeno que ha hecho necesario un campo de estudio en que el que se involucran de manera fundamental estas dos disciplinas. Por otro lado, se aporta valor metodológico al aplicar la técnica econométrica ARDL de prueba de límites al entendimiento de la trayectoria de largo plazo de las emisiones de CO<sub>2</sub> en presencia de las variables fundamentales crecimiento económico, inversiones extranjeras, consumo de energía y consumo de energía renovable que impactan directamente en el incremento o mitigación de las emisiones.

Finalmente, esta investigación contribuye directamente al Programa Nacional Estratégico de Energía y Cambio Climático del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) que busca generar información con base científica, promover una reflexión amplia e identificar acciones específicas para alcanzar un sistema energético sostenible y equitativo en México. Al mismo tiempo que aspira a impulsar estrategias de mitigación del impacto y riesgos del cambio climático en los diferentes sectores sociales y ecosistemas.

## Capítulo II. El fenómeno del cambio climático.

*A diferencia del aristotélico, en el modelo ptolemaico, cada planeta se mueve siguiendo dos orbitas: el deferente con la Tierra como centro, y el epiciclo que tiene como centro al deferente. Un planeta sigue entonces la trayectoria del deferente formando su órbita alrededor de la Tierra, al mismo tiempo, este recorrido lo realiza en movimientos circulares (los epiciclos), haciendo que el planeta se acerque y se aleje de la Tierra en diversos puntos de su órbita, incluso haciendo que disminuya su velocidad, se detenga, y se mueva en el sentido contrario (movimiento llamado retrógrado). Los epiciclos de Venus y de Mercurio están centrados siempre en una línea entre la Tierra y el Sol, lo que explicaría por qué siempre se encuentran cerca de él en el cielo.*

*Desafortunadamente, el sistema que estaba vigente en la época de Ptolomeo no concordaba con las mediciones, aun cuando había sido una mejora considerable respecto al sistema de Aristóteles. Algunas veces el tamaño del giro retrógrado de un planeta (más notablemente el de Marte) era más pequeño y a veces más grande. Esto lo impulsó a generar la idea de un ecuante. El sistema resultante, el cual finalmente logró amplia aceptación en occidente, fue visto como “muy complicado” a los ojos de la modernidad pues requería que cada planeta tuviera un epiciclo girando alrededor de un deferente, desplazado por un ecuante diferente para cada planeta. Pero el sistema predijo varios movimientos celestes, incluyendo el inicio y fin de los movimientos retrógrados más precisos para la época en que se desarrolló.*

Como se introducía en el capítulo anterior, el IPCC ha concluido que, inequívocamente, las actividades humanas, principalmente a través de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), han causado el calentamiento global, por ello, el cambio climático causado por el hombre ya está afectando a muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos en todas las regiones del planeta provocando efectos adversos generalizados,

perdidas y daños en la naturaleza y las personas (H. Lee, Calvin, Dasgupta, Krinner, Park, et al., 2023).

Pero, ¿Cómo es que las actividades humanas han tenido la capacidad para influir sobre el sistema tierra y causar el cambio climático actual? Las “actividades humanas” a que refiere el Panel de Expertos, ¿son actividades del sistema económico? Si es así, ¿En qué medida las actividades económicas son responsables de esta problemática?

Si bien es cierto, el campo de la economía ha reconocido el análisis y la gestión del cambio climático como un problema económico importante, y un número creciente de economistas están aportando al mundo su experiencia para entender el problema y desarrollar soluciones, no obstante, diversos investigadores del área indican que una incomodidad general con las ciencias físicas impide a muchas mentes económicas comprometerse más a fondo con el problema del cambio climático (Hsiang & Kopp, 2018).

La razón de incluir este capítulo es hacer una revisión de los fundamentos de la ciencia física del cambio climático e identificar cuáles son las actividades humanas responsables de las emisiones de gases de efecto invernadero. Por lo tanto, su finalidad es tener una mayor comprensión de la ciencia del clima y su relación con la ciencia económica.

## 2.1 El cambio climático y los mecanismos que lo originan

¿Qué es el cambio climático?

De manera estricta, en el informe especial del IPCC del año 2018 “Calentamiento global de 1.5 °C”, se define al cambio climático de la siguiente manera:

El cambio climático hace referencia a una variación del estado del clima identificable (p. ej., mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante períodos prolongados, generalmente décadas o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a

procesos internos naturales o a forzamientos externos, tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas y cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso de la tierra. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1, define el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. La CMNUCC diferencia, pues, entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales. (IPCC, 2018, p. 544)

Comprender esta definición puede resultar algo complejo, sobre todo si el lector no proviene de alguna de las disciplinas de la ciencia climática que le permita estar en contacto con el lenguaje técnico necesario para captar la naturaleza del fenómeno. Por otro lado, definir uno a uno los elementos anteriores, nos llevaría bastante tiempo y aun así no estaríamos seguros si realmente hemos comprendido esta naturaleza.

Consideramos entonces, que la mejor forma de abordar el fenómeno del cambio climático no es por las definiciones de sus componentes (al menos no de principio), en su lugar, se propone abordar el estudio de este fenómeno a partir del mecanismo principal que causa sus procesos claves, esto es, el calentamiento del planeta dado a partir del equilibrio en el balance energético terrestre.

### 2.1.1 El balance energético de la tierra

De manera simple, el balance energético terrestre se refiere al equilibrio entre la energía radiante (radiación solar) que el Sol suministra a la Tierra y la energía térmica (radiación

térmica infrarroja) liberada al espacio que se ha obtenido transformando la energía solar por los mecanismos del sistema terrestre.

Cómo regularmente sucede, las explicaciones más completas de un fenómeno, no provienen simplemente del “que”, o sea de la definición o el concepto, más bien es el “cómo”, lo que nos dará una explicación más enriquecedora que nos ayude a comprender a la esencia del tal fenómeno. Pues bien, a continuación, se expone la explicación del balance energético terrestre, guiándonos en la investigación agrupada de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA), particularmente por el trabajo de los científicos Kevin Trenbert, John Fasullo y Jeffrey Kiehl titulado “*Earth's Global Energy Budget*”.

Además, con el fin de ofrecer un lenguaje técnico accesible (sobre todo a los investigadores ajenos a esta disciplina) se complementan las explicaciones con el trabajo de divulgación “*Climate and Earth's Energy Budget*” de la escritora científica Rebecca Lindsey. Así, la explicación es como sigue.

Debido a que la superficie del Sol tiene una temperatura de unos 5 500 grados Celsius (o unos 5 800 grados Kelvin) la mayor parte de la energía que irradia es luz visible y del infrarrojo cercano. A la distancia media de la Tierra al Sol (unos 150 millones de kilómetros), la intensidad media de la energía solar que llega a la parte superior (en la atmósfera) directamente frente al Sol es de unos 1 360 vatios por metro cuadrado ( $W/m^2$ ). Esta cantidad de energía se conoce como radiación solar total (a veces llamada “constante solar”, antes de que los científicos descubrieran que varía en pequeña cantidad durante el ciclo de las manchas solares).

La radiación solar total es la máxima potencia posible que el Sol puede entregar a un planeta a la distancia promedio de la Tierra al Sol, sin embargo, la forma geométrica de la

Tierra limita la cantidad de energía solar real captada, por ejemplo, sólo la mitad de la Tierra está iluminada por el Sol al mismo tiempo, lo que reduce a la mitad la radiación solar total. En este sentido, gracias a las investigaciones de diversos grupos científicos entre ellos los de la NASA, se ha determinado que la cantidad promedio de luz solar que es captada por la parte superior de la atmósfera terrestre es una cuarta parte de la radiación solar total, es decir, unos  $340 \text{ W/m}^2$  aproximadamente.

De los  $340 \text{ W/m}^2$  que llegan a la atmosfera superior, a escala global, a lo largo del año, el sistema Tierra (superficie terrestre, océanos, atmósfera y sus componentes) absorbe un promedio de aproximadamente 240 vatios de energía solar por metro cuadrado (para tener una idea, un refrigerador de 11 pies consume alrededor de 250 vatios hora). La luz solar absorbida impulsa la fotosíntesis, alimenta la evaporación, derrite los hielos y calienta el sistema terrestre, de tal forma que el clima de la Tierra es entonces, un sistema impulsado por energía solar.

Como se apuntaba, al ser la Tierra una esfera (un elipsoide técnicamente), el Sol no la calienta de manera uniforme, lo hace en mayor medida en las regiones ecuatoriales que las polares. Para compensar los desequilibrios del calentamiento solar, la atmósfera y el océano trabajan sin parar mediante la evaporación del agua superficial, la convección, las precipitaciones, los vientos y la circulación oceánica, esta circulación combinada de la atmósfera y el océano se conoce como motor térmico de la Tierra.

El motor térmico de la Tierra no sólo debe redistribuir el calor solar desde el ecuador hacia los polos, sino también desde la superficie combinada de la Tierra y la atmósfera inferior, hasta su liberación al espacio, de lo contrario, la Tierra se calentaría sin cesar, esto es un proceso clave en la dinámica climática, ya que permite que la temperatura de la Tierra no aumente infinitamente porque la superficie y la atmósfera irradian calor simultáneamente al espacio. De esta manera, el flujo de energía solar captado y el flujo de energía liberado por

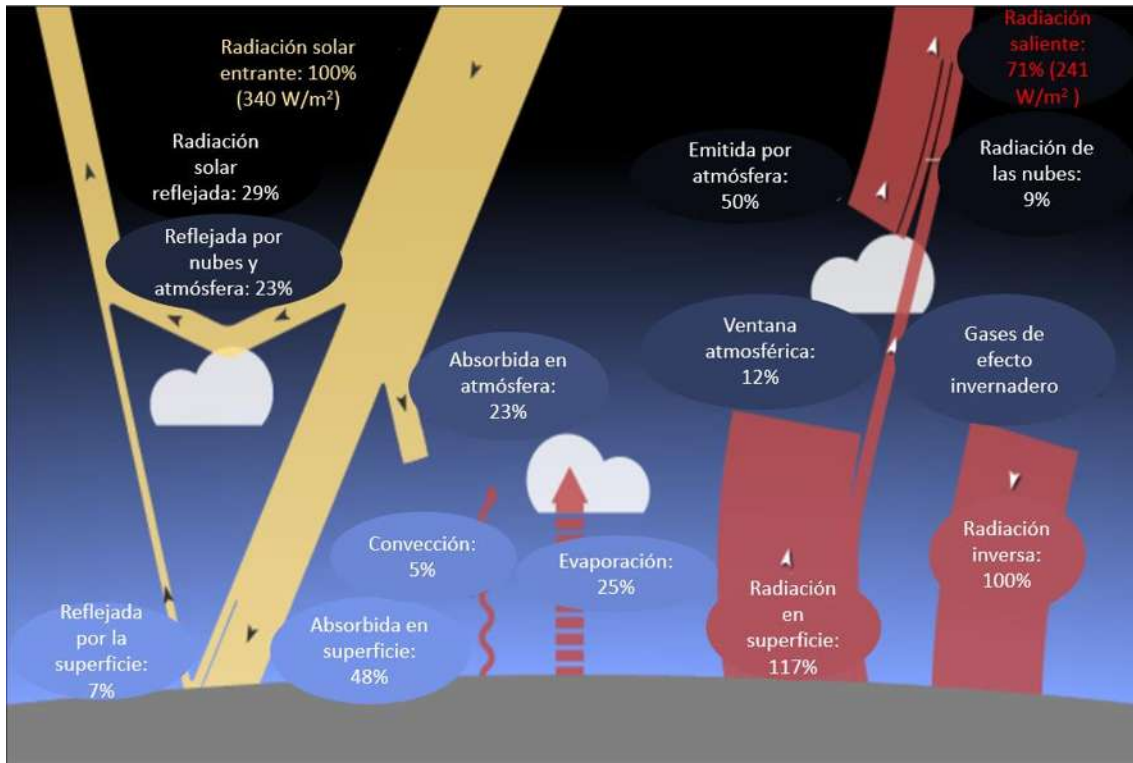
el sistema terrestre dan como resultado el flujo neto de energía conocido como balance energético de la Tierra.

Entender inicialmente estos dos flujos es primordial, ya que cuando el flujo de energía solar entrante se equilibra con un flujo igual de calor al espacio, se dice que la Tierra está en equilibrio radiativo y la temperatura global es relativamente estable. Cualquier cosa que aumente o disminuya la cantidad de energía entrante o saliente perturba el equilibrio radiativo de la Tierra y por consecuencia las temperaturas globales aumentarán o disminuirán en respuesta.

### **Desequilibrios en el balance energético**

¿A qué se debe el aumento de la temperatura global? Para responder a esta pregunta volvamos a los  $340 \text{ W/m}^2$  promedio de energía solar entrante hacia la tierra y analicemos su trayectoria con la ayuda de la figura 2. De los  $340 \text{ W/m}^2$  de energía solar (flujo amarillo) considerándolos como el 100%, entonces, alrededor de un 29% de la energía solar que llega a la parte superior de la atmósfera se refleja de regreso al espacio, 23% por las nubes y las partículas atmosféricas y de 6 a 7% por las superficies terrestres brillantes como el hielo marino y la nieve, a este porcentaje (del 29% aproximadamente) se le conoce como albedo y de principio no juega ningún papel en el sistema climático de la Tierra.

Figura 2. Flujos que determinan el balance energético de la tierra



Fuente: Ilustración tomada y adaptada de la NASA (Lindsay, 2009).

Por otro lado, aproximadamente el 71% de la energía solar total entrante es absorbida por el sistema Tierra en conjunto, es decir, unos 241 vatios por metro cuadrado. De ellos, alrededor del 23% de la energía solar entrante es absorbida en la atmósfera por el vapor de agua, el polvo y el ozono, y el otro 48% atraviesa la atmósfera y es absorbida por la superficie terrestre (Trenberth et al., 2009).

Antes de explicar el flujo energético liberado (flujos rojos) es importante saber ¿qué pasa cuando la materia terrestre absorbe la energía solar? Cuando la materia absorbe energía, los átomos y moléculas que componen el material se excitan y se mueven más rápidamente y el mayor movimiento eleva la temperatura del material. Sin embargo, la temperatura no aumenta infinitamente porque los átomos y las moléculas de la Tierra no sólo absorben la luz solar, sino que también irradian energía térmica infrarroja (calor). La cantidad de calor



que irradia una superficie es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura (si la temperatura se duplica, la energía irradiada aumenta en un factor de 16, es decir, 2 elevado a la cuarta potencia).

A escala global, si la temperatura de la Tierra aumenta, el planeta emite rápidamente una cantidad cada vez mayor de calor al espacio, este gran aumento en la pérdida de calor en respuesta a un aumento relativamente menor de la temperatura, denominado enfriamiento radiativo, es el mecanismo principal que previene el calentamiento descontrolado en la Tierra.

Vayamos ahora a la liberación de esta energía, si la atmósfera y la superficie de la Tierra juntas absorben el 71% de la radiación solar entrante, por la conservación de la energía, juntas deben irradiar esa cantidad de energía de regreso al espacio para que la temperatura promedio del planeta se mantenga estable. Sin embargo, la contribución relativa de la atmósfera y la superficie a cada proceso, absorber energía solar versus irradiar energía térmica, es asimétrica. La atmósfera absorbe el 23% de la luz solar entrante mientras que irradia el 59%, en cambio, la superficie absorbe el 48% y libera calor hacia el espacio equivalente al 12%.

En otras palabras, la mayor parte del calentamiento solar ocurre en la superficie, mientras que la mayor parte del enfriamiento radiativo ocurre en la atmósfera. ¿Cómo se produce esta reorganización de energía entre la superficie y la atmósfera?

Para comprender cómo el sistema climático de la Tierra equilibra el presupuesto energético, debemos considerar que el proceso ocurre en tres niveles: la superficie de la Tierra, donde tiene lugar la mayor parte del calentamiento solar; el borde de la atmósfera terrestre, por donde la luz solar ingresa al sistema; y la atmósfera intermedia. En cada nivel, la cantidad

de energía entrante y saliente, o flujo neto, debe ser igual. Expliquemos primero el nivel de la superficie terrestre.

Del 48% de la energía solar absorbida en superficie terrestre, el 25% sale de esta superficie a través de la evaporación, es decir, las moléculas de agua líquida absorben la energía solar entrante y cambian de fase de líquido a gas. La energía térmica que se necesitó para evaporar el agua está latente en los movimientos aleatorios de las moléculas de vapor de agua a medida que se propagan hacia la atmósfera. Cuando las moléculas de vapor de agua se condensan nuevamente en lluvia, el calor latente se libera a la atmósfera circundante. La evaporación de los océanos tropicales y la posterior liberación de calor latente son los principales impulsores del motor térmico atmosférico.

Un 5 a 6% adicional de la energía solar entrante sale de la superficie por convección. El aire en contacto directo con el suelo calentado por el sol se vuelve cálido y flotante. En general, la atmósfera es más cálida cerca de la superficie y más fría a mayor altitud y, en estas condiciones, el aire caliente se eleva, alejando el calor de la superficie.

Finalmente, una red de alrededor del 17% de la energía solar entrante sale de la superficie como energía térmica infrarroja irradiada por átomos y moléculas en la superficie. En la figura 3 se puede observar que este porcentaje no se encuentra de manera independiente, por el contrario, se expresa de manera conjunta como un flujo de 117% y en el mismo nivel se aprecia otro “flujo inverso” correspondiente al 100% de energía térmica, si desde el principio se ha señalado que en realidad se absorbe el 71% de la energía solar total, ¿de dónde proviene esta energía térmica adicional? La respuesta se encuentra en el efecto invernadero, veamos el “cómo”.

### 2.1.2 El efecto invernadero

Así como la energía entrante y saliente en la superficie de la Tierra debe equilibrarse, el flujo de energía hacia la atmósfera debe estar equilibrado por un flujo igual de energía fuera de la atmósfera y de regreso al espacio. Las mediciones satelitales indican que la atmósfera irradia energía térmica infrarroja equivalente al 59% de la energía solar entrante. Si la atmósfera irradia tanto, debe estar absorbiendo esa cantidad. ¿De dónde viene esa energía?

Recapitulando, las nubes, los aerosoles, el vapor de agua y el ozono absorben directamente el 23% de la energía solar entrante. La evaporación y la convección transfieren el 25% y el 5% de la energía solar entrante desde la superficie a la atmósfera, en suma, estos tres procesos transfieren el equivalente al 53% de la energía solar entrante a la atmósfera. Si el flujo total de energía entrante debe coincidir con la radiación térmica saliente observada en la parte superior de la atmósfera, ¿de dónde proviene la fracción del 5 al 6% restante? La energía restante proviene nuevamente de la superficie de la Tierra, pero, por un efecto particular que se produce en la atmósfera.

La atmósfera está compuesta principalmente por gases como el oxígeno y nitrógeno que son transparentes a la energía solar entrante y a la radiación térmica saliente. Sin embargo, el vapor de agua, el dióxido de carbono, el metano y otros gases traza son opacos a muchas longitudes de onda de la energía térmica infrarroja, por lo que no permiten su liberación y, por el contrario, son muy eficientes absorbiendo este tipo de energía.

Por esta razón, del 17% de la energía saliente en forma de infrarrojo térmico, la cantidad que escapa directamente al espacio es solo una fracción que se calcula en alrededor del 12%, lo que significa que la fracción restante, un 5 a 6% aproximadamente de esta energía está siendo continuamente absorbida y redirigido por las moléculas de gases señalados

anteriormente, iniciando lo que conocemos como el efecto invernadero y tomando de ahí el nombre de gases de efecto de invernadero o GEI.

Cuando las moléculas de gases de efecto invernadero absorben energía térmica infrarroja, su temperatura aumenta e irradian una mayor cantidad de energía térmica infrarroja en todas direcciones. El calor irradiado hacia arriba continúa encontrando moléculas de gases de efecto invernadero, esas moléculas a su vez, absorben el calor y su temperatura vuelve a aumentar la cantidad de calor que irradian. El efecto se repite hasta que a una altitud de aproximadamente 5 o 6 kilómetros, la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera que la cubre es tan pequeña que el calor puede irradiarse libremente al espacio.

Por otro lado, debido a que las moléculas de gases de efecto invernadero irradian calor en todas direcciones, una parte se propaga hacia abajo y finalmente vuelve a entrar en contacto con la superficie de la Tierra, donde es reabsorbida originando que la temperatura de la superficie se vuelve más cálida de lo que sería si se calentara únicamente mediante energía solar directa. Este calentamiento complementario de la superficie de la Tierra por la atmósfera es el efecto invernadero natural.

¿Por qué el efecto invernadero natural no provoca un aumento acelerado de la temperatura de la superficie? Como se ha visto, porque la cantidad de energía que irradia una superficie siempre aumenta más rápido de lo que aumenta su temperatura. A medida que el calentamiento solar y la “radiación de retorno” de la atmósfera aumentan la temperatura de la superficie, la superficie libera simultáneamente una cantidad cada vez mayor de calor, equivalente a aproximadamente al 117% de la energía total emitida por el sol. El flujo neto de calor ascendente del 17% es resultado entonces, de la energía térmica total liberada en superficie equivalente al 117% menos el 100% de la radiación térmica de retorno que ha producido por el efecto invernadero

El efecto invernadero natural eleva la temperatura de la superficie de la Tierra a unos 15 °C en promedio, 30 grados más de lo que sería si no tuviera atmósfera, dotando al planeta de las condiciones de temperatura ideales para el desarrollo de la vida como la conocemos.

Finalmente, si sumamos el 5% de la energía térmica liberada por convección, más el 25% liberada por evaporación, más el 23% que la atmósfera absorbe y libera inicialmente, más el 6% que redirigen inicialmente los gases de efecto invernadero, más el 12% liberado en superficie que si escapa por la “ventana atmosférica”, obtenemos el 71% que el sistema tierra captó en forma de energía solar y que libera en el mismo porcentaje en forma de energía térmica hacia el espacio, produciendo (por los mecanismos descritos anteriormente), el equilibrio radiativo o dicho de otra forma, el equilibrio en el balance energético terrestre.

### **Forzamientos climáticos**

Ahora que conocemos el proceso principal por medio del cual se determina la temperatura de la tierra y en consecuencia el estado del sistema climático, es importante remarcar que cualquier alteración en los componentes del sistema climático de la Tierra que afecte la cantidad de energía que entra o sale del sistema, alterará el equilibrio radiativo y podrá obligar a que las temperaturas aumenten o disminuyan en respuesta. Estas influencias desestabilizadoras se denominan *forzamientos climáticos* y pueden dividirse en naturales y antropogénicos (Lindsay, 2009).

Los forzamientos climáticos naturales incluyen:

- 1) Cambios en el brillo del Sol
- 2) Ciclos de Milankovitch (pequeñas variaciones en la forma de la órbita de la Tierra y su eje de rotación que ocurren durante miles de años) y

3) Grandes erupciones volcánicas que inyectan partículas que reflejan la luz hasta la estratosfera.

Por otro lado, los forzamientos antropogénicos incluyen:

- 1) La contaminación por aerosoles, que absorben y reflejan la luz solar entrante;
- 2) La deforestación, que cambia el albedo, es decir, la forma en que la superficie refleja y absorbe la luz solar; y
- 3) La creciente concentración de dióxido de carbono atmosférico y otros gases de efecto invernadero, que disminuyen el calor irradiado al espacio.

Además, dentro del mismo sistema climático, existen otros cambios en el clima provocados por la tierra que se describen como "retroalimentaciones" del sistema climático: procesos por los cuales el cambio climático influye en alguna propiedad de la tierra, que a su vez disminuye (retroalimentación negativa) o amplifica (retroalimentación positiva) el cambio climático. Ejemplos de retroalimentaciones son los cambios en la fuerza de los sumideros o fuentes de carbono terrestre, la humedad del suelo y la fenología de las plantas.

Para conocer más sobre cómo se presentan estas retroalimentaciones y cómo influyen en el sistema climático, en la siguiente sección, se presentan las interacciones biofísicas y biogeoquímicas que el Panel de Expertos sobre el Cambio Climático, en su informe especial de 2019 "*Climate Change and Land*", ha identificado como los efectos rigen la dinámica climática en diferentes escalas temporales y espaciales. Comencemos con una breve referencia al Panel.

### 2.1.3 Interacciones biofísicas y biogeoquímicas del clima

El estudio agrupado sobre la base científica del cambio climático, sus repercusiones y futuros riesgos, así como las opciones que existen para adaptarse al mismo y atenuar sus

efectos ha cobrado tal relevancia a nivel mundial que, en 1988 la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) crearon el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático como órgano internacional encargado de facilitar a las instancias normativas las evaluaciones periódicas correspondientes a este fenómeno (IPCC, 2013).

Desde su creación, el IPCC ha elaborado ya seis informes completos de evaluación, así como reportes especiales, los cuales son contribuciones de tres grupos de trabajo. El grupo I se ocupa de las bases de las ciencias físicas del cambio climático, el grupo II de los impactos, la adaptación y la vulnerabilidad y el grupo de III de su mitigación. Cada informe de evaluación está conformado a su vez por tres reportes individuales y un informe de síntesis.

De acuerdo con el IPCC (2018) el sistema climático es un sistema muy complejo que consta de cinco componentes principales: atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera y biosfera, y de las interacciones entre ellos. El sistema climático evoluciona en el tiempo bajo la influencia de su propio comportamiento interno y por efecto de forzamientos externos, como las erupciones volcánicas o las variaciones solares, y de forzamientos antropógenos (humanos), como la alteración en la composición de la atmósfera o el cambio de uso de la tierra (Matthews, 2018).

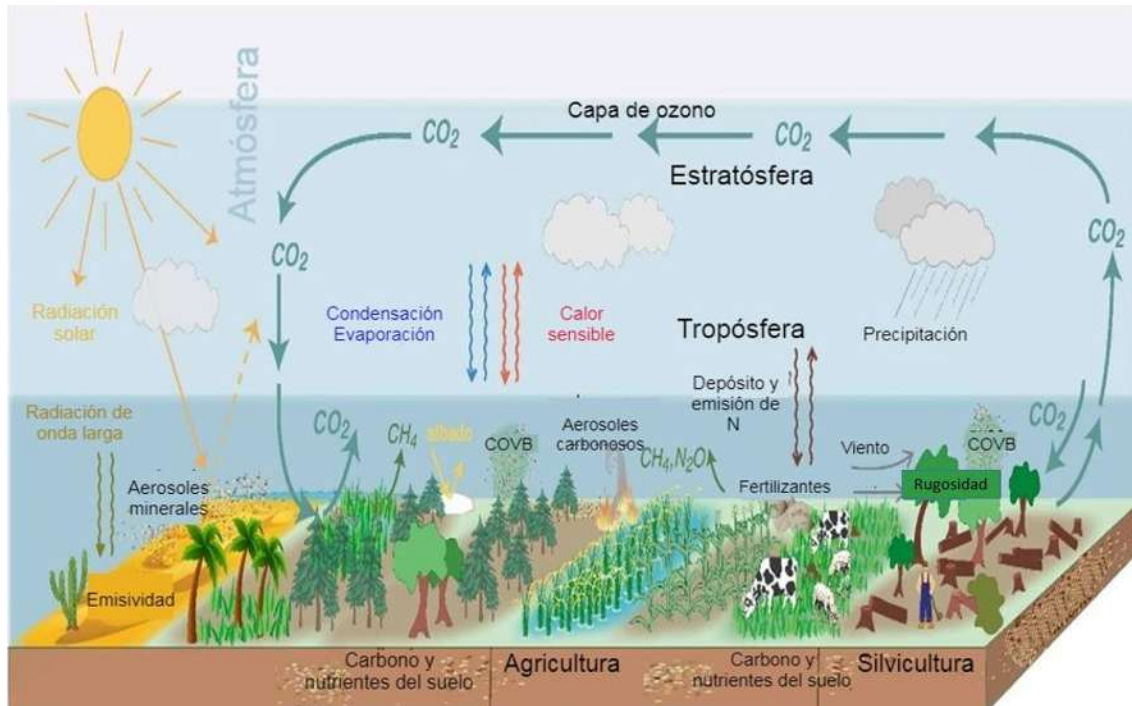
La tierra interactúa continuamente con la atmósfera a través de intercambios de, por ejemplo, gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O principalmente), agua, energía o precursores de forzadores climáticos de vida corta (compuestos orgánicos volátiles biogénicos, polvo o carbono negro). La biosfera terrestre también interactúa con los océanos a través de procesos como la entrada de agua dulce, nutrientes, carbono y partículas. Estas interacciones afectan a dónde y cuándo cae la lluvia y, por tanto, a las

necesidades de riego de los cultivos, a la frecuencia e intensidad de las olas de calor y a la calidad del aire (IPCC, 2019).

Por otro lado, estas mismas interacciones se ven modificadas por el cambio climático global y regional, las variaciones climáticas decenales, interanuales y estacionales, y los fenómenos meteorológicos extremos, así como por las acciones humanas sobre la tierra (por ejemplo, la gestión de cultivos y bosques, la forestación y la deforestación) afectando a la composición atmosférica, la temperatura de la superficie, el ciclo hidrológico y, por tanto, al clima local, regional y mundial. En la figura 3 se introducen algunos de los procesos terrestres fundamentales que rigen los efectos biofísicos y biogeoquímicos, así como las retroalimentaciones que influyen en el estado del clima. Comencemos describiendo las interacciones biofísicas.



Figura 3. Interacciones subyacentes del sistema climático



Fuente: Ilustración adaptada del capítulo "Interacciones tierra-clima" publicado por el IPCC (2019).

Las "interacciones biofísicas" son intercambios de agua y energía entre la tierra y la atmósfera. La tierra se calienta al absorber la radiación solar y de onda larga; se enfría mediante transferencias de calor sensible (por conducción y convección) y calor latente (energía asociada a la evapotranspiración del agua) a la atmósfera y mediante la emisión de radiación de onda larga desde la superficie terrestre. Estas interacciones entre la tierra y la atmósfera dependen de las características de la superficie terrestre, incluida la reflectividad de la radiación de onda corta (albedo), la emisividad de la radiación de onda larga por parte de la vegetación y los suelos, la rugosidad de la superficie y el acceso al agua del suelo por parte de la vegetación, que depende tanto de las características del suelo como de la cantidad de raíces.

A lo largo de escalas temporales estacionales, interanuales y decenales, estas características varían entre los distintos tipos de cubierta y uso del suelo y se ven afectadas tanto por los procesos naturales como por la gestión del suelo (Anderson et al., 2011).

Por ejemplo, una vegetación densa con un alto índice de área foliar, como los bosques, puede absorber más energía que la vegetación herbácea cercana debido en parte a las diferencias en el albedo superficial (especialmente cuando hay nieve en el suelo). Sin embargo, una vegetación más densa también devuelve más energía a la atmósfera en forma de evapotranspiración (evaporación del suelo más transpiración de las plantas) (Bonan, 2008; Burakowski et al., 2018; Ellison et al., 2017) y esto contribuye a los cambios en el contenido de vapor de agua atmosférico y, posteriormente, a los cambios en las precipitaciones.

Especialmente en las regiones extratropicales, estas características muestran fuertes patrones estacionales con el desarrollo y la senescencia (cambio en las hojas) de la vegetación. Por ejemplo, en los bosques caducifolios, el crecimiento estacional aumenta el albedo en un 20 a 50% desde los mínimos de primavera hasta los máximos de la estación de crecimiento, seguido de una rápida disminución durante la caída de las hojas, mientras que en los pastizales, el reverdecimiento primaveral provoca disminuciones del albedo y solo aumenta con el pardeamiento de la vegetación (Hollinger et al., 2010).

Como resultado en parte de efectos biofísicos, la tierra se calienta al absorber la radiación solar y la radiación de onda larga (energía térmica); se enfría mediante transferencias de calor sensible (por conducción y convección) y calor latente (energía asociada a la evaporación del agua) a la atmósfera y mediante la emisión de radiación de onda larga desde la superficie terrestre. Los patrones estacionales de los flujos de calor sensible y latente también están determinados por el ciclo de desarrollo y senescencia de las hojas en los bosques caducifolios templados: los flujos de calor sensible alcanzan su máximo en

primavera y otoño y los flujos de calor latente alcanzan su máximo a mediados del verano (Moore et al., 1996; Richardson et al., 2013).

En este mismo proceso, se encuentran las "interacciones biogeoquímicas" descritas como los intercambios de GEI entre la tierra y la atmósfera impulsadas principalmente por el equilibrio entre la fotosíntesis y la respiración de las plantas, así como por la descomposición de la materia orgánica en suelo por parte de los microbios, por esta razón, además de CO<sub>2</sub>, los suelos emiten metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Debido a que las variaciones de la temperatura y la humedad del suelo afectan en gran medida a las actividades microbianas, por lo tanto, afectaran también a los flujos resultantes de estos tres GEI (Jia et al., 2019).

#### 2.1.4 Los conceptos del calentamiento global y cambio climático

Con la literatura fundamental de la ciencia del clima revisada hasta ahora se cumple la primera parte del objetivo del capítulo, en esta sección completamos esta primera parte del objetivo exponiendo nuevamente el concepto de cambio climático, pero ahora, será necesario hacer la distinción correspondiente de otro término que a menudo suele ser utilizado de manera indistinta junto con el del cambio climático: el calentamiento global.

Siguiendo con el marco referencial de la NASA, el calentamiento global se refiere solo a la temperatura de la superficie de la Tierra, mientras que el cambio climático incluye el calentamiento y los "efectos secundarios" de este calentamiento (como son los glaciares que se derriten, tormentas de lluvia más severas o las sequías más frecuentes, entre otros). Dicho de otra manera, el calentamiento global es un síntoma (tal vez el más persistente y visible) de un problema de mayor magnitud que es el cambio climático global causado por los seres humanos (Kennedy & Lindsey, 2018).

¿Por qué suele utilizarse de manera indistinta estos términos? De acuerdo con Weart (2008), a finales de 1800, los científicos estaban planteando la hipótesis de que la industrialización, impulsada por la quema de combustibles fósiles para la energía, tenía el potencial de modificar el clima. Pero durante muchas décadas no estuvieron seguros de si el enfriamiento (debido al reflejo de la luz solar de la contaminación) o el calentamiento (debido a los gases de efecto invernadero) dominaría.

Sin embargo, a mediados de la década de 1970, cada vez más evidencias sugerían que el calentamiento dominaría y que sería diferente a cualquier otro episodio de calentamiento natural. Es importante señalar que, aunque el estudio agrupado y reconocido a nivel internacional del cambio climático inició con la creación del IPCC en 1988, los trabajos que advertían sobre estos efectos pueden rastrearse hasta hace más de 150 años por ejemplo con los trabajos de Foote (1856), Tyndall (1860) y Arrhenius (1896).

Pues bien, la frase "calentamiento global" surgió para describir ese consenso científico. En décadas posteriores (siete al menos, después del trabajo de Arrhenius), los científicos se hicieron más conscientes de que el calentamiento global no era el único impacto del exceso de calor absorbido por los gases de efecto invernadero. Otros cambios (el aumento del nivel del mar, la intensificación del ciclo del agua, el estrés sobre las plantas y los animales) probablemente serían mucho más importantes para nuestras vidas cotidianas y economías. Así, a partir de la década de 1990, los científicos utilizaron cada vez más el "cambio climático causado por los seres humanos" para describir el desafío que enfrenta el planeta (Weart, 2008).

Complementando con Kennedy y Lindsey (2018) el calentamiento global actual es un tipo de cambio climático sin precedentes, y está generando una cascada de efectos secundarios en el sistema climático. Son estos efectos secundarios, como por ejemplo, los cambios en el nivel del mar a lo largo de costas muy pobladas y la retirada mundial de los glaciares de

montaña de los que dependen millones de personas para el agua potable y la agricultura, que probablemente tengan un impacto mucho mayor en la sociedad y su economía que el cambio de temperatura por sí solo.

## 2.2 Los gases de efecto invernadero.

Hasta este momento, la revisión de los fundamentos de la ciencia climática nos ha dejado ver una serie de factores y procesos que son los responsables del fenómeno del cambio climático, el segundo objetivo de este capítulo es establecer el nexo entre el sistema climático y el sistema económico, para ello, se profundizará en la premisa general en la que es consistente la literatura climática: los humanos han causado el calentamiento global y por consecuencia el cambio climático, principalmente a través de las nuevas emisiones de gases de efecto invernadero.

Esta primera conexión, no debe ser vista como la única que puede existir, ya que como se ha señalado, son complejos y variados los factores, procesos y relaciones que originan este fenómeno. Sin embargo, los investigadores de esta disciplina han tenido un gran avance en el esclarecimiento de los componentes y relaciones clave en la dinámica del sistema climático. Comenzamos la sección indagando sobre la naturaleza y origen de los gases de efecto invernadero.

### 2.2.1 Naturaleza de los gases de efecto invernadero

¿Qué son los gases de efecto invernadero?

Los gases de efecto invernadero son aquellos componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropogénicos, que absorben y emiten radiación en longitudes de onda específicas dentro del espectro de la radiación terrestre emitida por la superficie de la Tierra, la propia atmósfera y las nubes. El vapor de agua (H<sub>2</sub>O), el dióxido de carbono

(CO<sub>2</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), el metano (CH<sub>4</sub>) y el ozono (O<sub>3</sub>) son los principales GEI de la atmósfera terrestre. Además, hay un grupo de GEI de origen totalmente humano en la atmósfera, como los halocarbonos, gases fluorados y otras sustancias que contienen cloro y bromo (IPCC, 2018).

De acuerdo con Tuckett (2019), las propiedades fundamentales de un gas de efecto invernadero son dos: la capacidad de absorción y emisión de energía radiativa y su tiempo de vida en la atmósfera terrestre: cuanto mayor sea el tiempo de vida y cuanto mayor sea capacidad de emisión de energía radiativa, mayor será la contribución de un gas de efecto invernadero al calentamiento global. Estas dos características se combinan entre sí para calcular un número índice conocido como potencial de calentamiento global (PCG).

De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos, el PCG se desarrolló para permitir comparaciones de los impactos de diferentes gases en el calentamiento global. Específicamente, es una medida de cuánta energía absorberán las emisiones de 1 tonelada de gas durante un período de tiempo determinado, en relación con las emisiones de 1 tonelada de dióxido de carbono (también suele expresarse kilogramo por kilogramo). Cuanto mayor es el PCG de un gas, mayor será el calentamiento de la Tierra en comparación con el PCG del CO<sub>2</sub>, habitualmente, el período utilizado para los PCG es de 100 años.

Los PCG proporcionan una unidad de medida común, que permite a los analistas sumar estimaciones de emisiones de diferentes gases (por ejemplo, compilar un inventario nacional de GEI) y permite a los formuladores de políticas comparar oportunidades de reducción de emisiones entre sectores y gases (US EPA, 2016).

Conozcamos a continuación las características de los principales GEI identificados en la atmósfera terrestre. Esto es relevante ya que por medio de estas características sabemos,

cuáles son las principales actividades humanas que producen a estos gases pudiendo identificar que no son actividades humanas generalizadas, en realidad son actividades humanas específicas que se desarrollan dentro de la actividad económica.

El dióxido de carbono

El dióxido de carbono se produce de forma natural en la atmósfera como parte del ciclo del carbono de la Tierra (la circulación natural del carbono entre la atmósfera, los océanos, la tierra, las plantas y los animales). Las actividades humanas alteran el ciclo del carbono añadiendo más CO<sub>2</sub> a la atmósfera, influyendo en la capacidad de los sumideros naturales (como los bosques) para eliminar CO<sub>2</sub> de la atmósfera e influyendo en la capacidad de la tierra para almacenar carbono.

La principal actividad humana que emite CO<sub>2</sub> es la combustión de combustibles fósiles, carbón, gas natural y petróleo, con fines de generación de energía y transporte, aunque determinados procesos industriales y cambios en el uso del suelo también emiten CO<sub>2</sub>. Varios procesos también producen emisiones de CO<sub>2</sub> a través de reacciones químicas sin combustión, por ejemplo, la producción y el consumo de productos minerales como el cemento, la producción de metales como el hierro y el acero, y la producción de productos químicos. Hay que tener en cuenta que muchos procesos industriales también utilizan electricidad y, por tanto, causan indirectamente emisiones por la producción de electricidad.

El dióxido de carbono se intercambia constantemente entre la atmósfera, los océanos y la superficie terrestre, ya que es producido y absorbido por muchos microorganismos, plantas y animales. Sin embargo, las emisiones y absorciones de CO<sub>2</sub> procedentes de estos procesos naturales tienden a equilibrarse sin que se produzcan impactos antropogénicos. Desde el inicio de la Revolución Industrial, alrededor de 1750, las actividades humanas han contribuido sustancialmente al cambio climático porque han introducido en la atmósfera

CO<sub>2</sub> y otros gases que atrapan el calor. Por definición, su PCA es igual a 1 en un periodo de cien años (US EPA, 2021a). Por otra parte, se ha descubierto que entre el 20 y el 35% del CO<sub>2</sub> permanece en la atmósfera tras equilibrarse con el océano durante aproximadamente 200-2 000 años (Archer et al., 2009).

## Metano

Entre las actividades humanas que emiten metano se encuentran las fugas de los sistemas de gas y la ganadería. El metano también tiene fuentes naturales de emisión, como los humedales naturales. Además, los procesos naturales que tienen lugar en la tierra y las reacciones químicas en la atmósfera contribuyen a eliminar el CH<sub>4</sub> de la atmósfera. La persistencia del metano en la atmósfera durante 12 años es mucho menor que la del dióxido de carbono, pero el CH<sub>4</sub> es más eficaz que el CO<sub>2</sub> a la hora de captar la radiación. Kilogramo por kilogramo, el impacto comparativo del CH<sub>4</sub> es 25 veces mayor que el del CO<sub>2</sub> en un periodo de 100 años (US EPA, 2021c).

Energía e industria. Los sistemas de gas natural y petróleo son la mayor fuente de emisiones de CH<sub>4</sub>. El metano es el principal componente del gas natural. El metano se emite a la atmósfera durante la producción, procesamiento, almacenamiento, transmisión y distribución de gas natural y durante la producción, refinado, transporte y almacenamiento de petróleo crudo. La minería del carbón también emite CH<sub>4</sub>.

La agricultura. El ganado doméstico, como vacas, cerdos, ovejas y cabras, produce CH<sub>4</sub> como parte de su proceso digestivo normal. Además, cuando el estiércol animal se almacena o manipula en lagunas o tanques de retención, también se produce CH<sub>4</sub>. Dado que los seres humanos crían este ganado para producir alimentos y otros productos, las emisiones se consideran relacionadas con una actividad humana.



Residuos de hogares y empresas. El metano se genera en los vertederos cuando los residuos se descomponen y también en el tratamiento de las aguas residuales. Numerosas fuentes naturales también emiten metano. Los humedales naturales son la mayor fuente y emiten CH<sub>4</sub> a partir de bacterias que descomponen materiales orgánicos en ausencia de oxígeno. Otras fuentes son las termitas, los océanos, los sedimentos, los volcanes y los incendios forestales (US EPA, 2021c).

### Óxido nitroso

Diversas actividades humanas, como la agricultura, la combustión de combustibles, la gestión de aguas residuales y los procesos industriales, aumentan la cantidad de N<sub>2</sub>O en la atmósfera. El óxido nitroso también se produce de forma natural en la atmósfera como parte del ciclo del nitrógeno de la Tierra, y tiene varias fuentes naturales. Las moléculas de óxido nitroso permanecen en la atmósfera una media de 114 años antes de ser eliminadas por un sumidero natural o destruidas por reacciones químicas. El impacto de 1 kilogramo de N<sub>2</sub>O en el calentamiento atmosférico es casi 300 veces superior al de 1 kilogramo de dióxido de carbono (US EPA, 2021d).

Agricultura. El óxido nitroso puede ser el resultado de diversas actividades de gestión de las tierras agrícolas y otras prácticas agrícolas, la gestión del estiércol o la quema de residuos agrícolas. El óxido nitroso también se emite cuando se queman combustibles. La cantidad de N<sub>2</sub>O emitida por la combustión de combustibles depende del tipo de combustible y de la tecnología de combustión, del mantenimiento de los equipos y de las prácticas operativas.

Industria. El óxido nitroso se genera como subproducto durante la producción de productos químicos como el ácido nítrico, que se utiliza para producir fertilizantes comerciales

sintéticos, y en la producción de ácido adípico, que se utiliza para fabricar fibras (como el nailon) y otros productos sintéticos.

Residuos. El óxido nitroso también se genera en el tratamiento de aguas residuales domésticas durante la nitrificación y desnitrificación del nitrógeno presente, normalmente en forma de urea, amoníaco y proteínas. Las emisiones naturales de N<sub>2</sub>O proceden principalmente de las bacterias que descomponen el nitrógeno en la tierra y en los océanos. El óxido nitroso se elimina de la atmósfera cuando es absorbido por ciertos tipos de bacterias o destruido por la radiación ultravioleta o por reacciones químicas (US EPA, 2021d).

#### Gases fluorados (gases fluorados)

A diferencia de otros gases de efecto invernadero, los gases fluorados no tienen fuentes naturales y sólo proceden de actividades relacionadas con el hombre. Se emiten cuando se utilizan como sustitutos de sustancias que agotan la capa de ozono (por ejemplo, refrigerantes) y a través de diversos procesos industriales como la fabricación de aluminio y semiconductores. Muchos gases fluorados tienen un potencial de calentamiento global muy elevado en comparación con otros gases de efecto invernadero; por tanto, incluso concentraciones atmosféricas bajas pueden tener efectos desproporcionadamente grandes sobre las temperaturas globales.

También pueden tener una larga persistencia en la atmósfera, en algunos casos de hasta miles de años. Al igual que otros gases de efecto invernadero muy persistentes, la mayoría de los gases fluorados se mezclan bien en la atmósfera y se dispersan por todo el mundo tras su emisión. Muchos gases fluorados sólo se eliminan de la atmósfera cuando son destruidos por la luz solar en la atmósfera superior. En general, los gases fluorados son el

tipo más potente y persistente de gases de efecto invernadero emitidos por las actividades humanas.

Se dividen en cuatro categorías principales: hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarburos (PFC), hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) y trifluoruro de nitrógeno (NF<sub>3</sub>). A continuación se describen las principales fuentes de emisión de gases fluorados.

Sustitución de sustancias que agotan la capa de ozono. Los hidrofluorocarburos se utilizan como refrigerantes, propulsores de aerosoles, agentes espumantes, disolventes y retardantes de llama. La principal fuente de emisiones de estos compuestos es su uso como refrigerantes, por ejemplo en sistemas de aire acondicionado, tanto en vehículos como en edificios. Estos productos químicos se desarrollaron para sustituir a los clorofluorocarbonos (CFC) y los hidroclorofluorocarbonos (HCFC) porque no destruyen la capa de ozono estratosférica.

Industria. Los perfluorocarburos se generan como subproducto de la producción de aluminio y se utilizan en la fabricación de semiconductores. Los PFC suelen tener una elevada persistencia atmosférica y valores de PCA cercanos a 10 000. El hexafluoruro de azufre se utiliza en el procesamiento del magnesio y la fabricación de semiconductores, y como gas trazador para la detección de fugas. El HFC-23 se genera como subproducto de la producción de HCFC-22 y se utiliza en la fabricación de semiconductores.

Transmisión y distribución de electricidad. El hexafluoruro de azufre se utiliza como gas aislante en los equipos de transmisión de electricidad, incluidos los disyuntores. El valor GWP del SF<sub>6</sub> es de 22 800; esto lo convierte en el gas de efecto invernadero más potente evaluado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (US EPA, 2021b).

Ahora que conocemos las actividades tanto naturales como económicas y los potenciales de calentamiento global de los GEI con mayor impacto en el calentamiento global, en la siguiente sección presentamos estos GEI de acuerdo a la cantidad que toneladas que se han emitido, para ello se utilizan diversas bases de datos entre ellas el *PRIMAP-hist*.

### 2.2.2 Emisiones globales de GEI

Las emisiones globales de gases de efecto invernadero se han convertido en un tema crucial en los esfuerzos por abordar el cambio climático. Como se señaló, estas emisiones provienen de una variedad de fuentes humanas, incluyendo la quema de combustibles fósiles para la generación de energía, la industria, la agricultura y la deforestación, entre otras actividades. A continuación, realizamos un análisis de las trayectorias globales que han seguido los principales GEI desde el año 1850 hasta el año 2022 desagregando los datos por tipo de gas, sector y actividades económicas específicas, para ello utilizamos el conjunto de datos *PRIMAP-hist* del Instituto Potsdam para la Investigación del Impacto Climático (PIK).

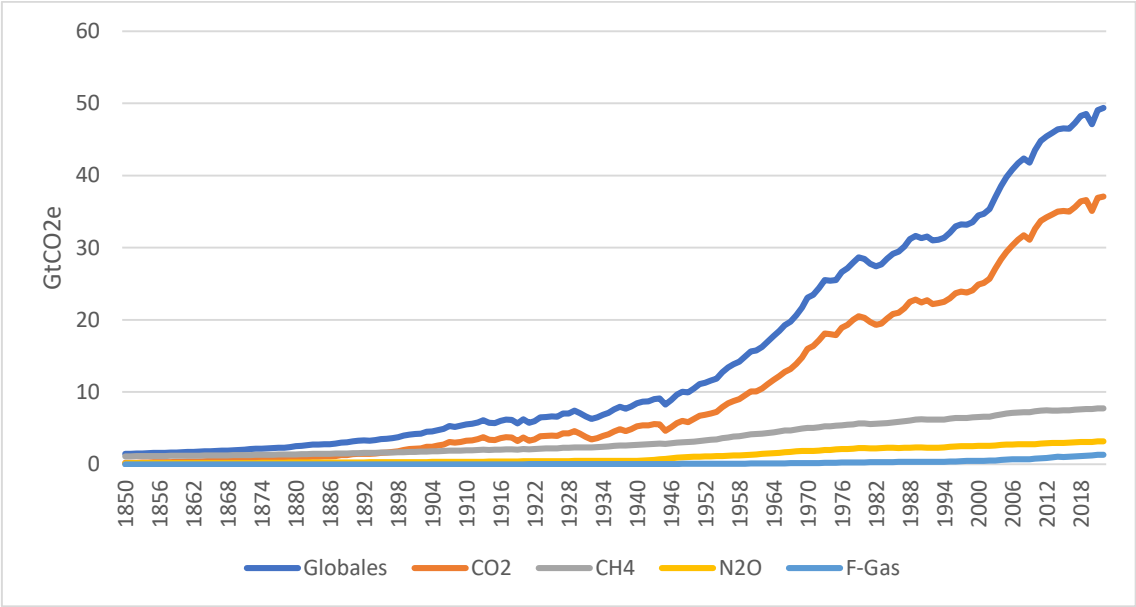
El conjunto de datos PRIMAP-hist combina varios conjuntos de datos publicados para crear un conjunto completo de trayectorias de emisiones de gases de efecto invernadero para cada país y gas de Kioto que cubren los años 1750 a 2022, y todos los estados miembros de la CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático), así como la mayoría de los territorios no miembros de la CMNUCC. Estos datos pueden ser conocidos a través del portal del PIK o en la plataforma *Climate Watch*, donde se utiliza el escenario en el que los datos comunicados por los países tienen prioridad sobre los datos de terceros.

Los datos resuelven las principales categorías del IPCC de 2006. Se dispone de datos subsectoriales de energía, procesos industriales, agricultura y residuos para CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O. Debido a la disponibilidad de datos y a cuestiones metodológicas, el conjunto de datos

PRIMAP-hist no incluye las emisiones procedentes del uso del suelo, el cambio de uso del suelo y la silvicultura (LULUCF). Las emisiones distintas del CO<sub>2</sub> se expresan en equivalentes de CO<sub>2</sub> utilizando los valores de potencial de calentamiento global a 100 años del Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (Gütschow et al., 2016).

En la figura 4, se muestran las trayectorias globales de GEI desde el año 1850 al año 2022 medidas en gigatoneladas (simbolizada con Gt, es igual a mil millones de toneladas) de CO<sub>2</sub> eqivalente (GtCO<sub>2</sub>e). La línea azul marino representa la suma anual de los principales GEI identificados en la atmosfera, la línea naranja representa el las Gt anuales de CO<sub>2</sub> (en este caso dado que es el gas de referencia, se expresa sin la nomenclatura de equivalencia “e”), la línea gris representa las emisiones de metano y las líneas amarillo y azul cielo representa las emisiones de óxido nitroso y gases flourados respectivamente.

Figura 4 Emisiones globales de GEI por tipo de gas, 1850 - 2022 (GtCO<sub>2</sub>e).



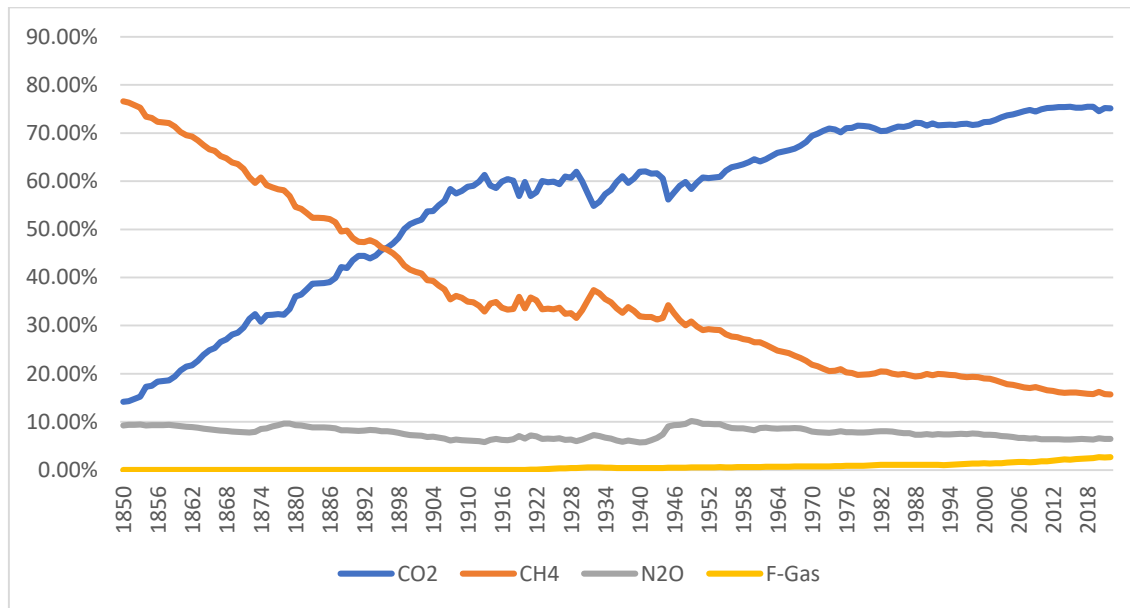
Fuente: Elaboración propia con datos de Gütschow et al. (2016) y Gütschow & Pflüger (2023).

De 1850 a 2022, las emisiones de GEI globales aumentaron de 1.44 GtCO<sub>2</sub>e a 49.35 GtCO<sub>2</sub>e lo que se traduce en un aumento de más de 33 veces su valor inicial o bien en un aumento de más de 3300%, se puede apreciar que superar el límite de las 10 GtCO<sub>2</sub> tardo alrededor 100 años desde 1850, sin embargo, es notorio que al haber superado esa cantidad hacia el año 1950, fueron necesarios menos de 20 años para que el total de emisiones incrementaran de 10.48 a 20.63 GtCO<sub>2</sub>e en 1968, el comportamiento es similar para las siguientes décadas, lo que resalta la rapidez con la que se emiten cada vez más emisiones de GEI.

En el caso del dióxido de carbono, es evidente porque es el GEI con mayor impacto al cambio climático, tan solo el último año 2022, de las más de 49 Gt el CO<sub>2</sub> participó con más de 37 Gt, lo que representa alrededor de 75% del total. El metano en su caso, aunque ahora sabemos que tiene un PCG de 25 veces, sus emisiones todavía no han superado las 10 GtCO<sub>2</sub>, manteniéndose incluso por debajo de las 8 gigatoneladas.

Finalmente, el óxido nitroso y los gases F han contribuido con menos emisiones alcanzando en los últimos años alrededor de 3.1 y 1.3 GtCO<sub>2</sub>e respectivamente. Otra forma de representar estas emisiones es través de su participación porcentual respecto del total, en la figura 5 se muestra esta contribución.

Figura 5 Participación porcentual principales GEI respecto del total, 1850 – 2022 (GtCO<sub>2</sub>e).



Fuente: Elaboración propia con datos de Gütschow & Pflüger (2023).

La primera observación va encaminada a la correlación inversa entre la trayectoria del CO<sub>2</sub> y del CH<sub>4</sub>, a inicios de 1850 el metano era el GEI que alcanzaba una participación porcentual alrededor del 76% respecto del total de ese año y por otro lado la participación del dióxido de carbono se registraba alrededor del 14%, sin embargo, a medida que el CO<sub>2</sub> ha ido incrementando en el tiempo, el CH<sub>4</sub> ha disminuido. Desde principios de la década de 1950 el CO<sub>2</sub> representó, por sí solo, más del 60% del total de las emisiones y a principios de la década de 1970 ya representaba alrededor del 70% del total de los GEI. Para el año 2022, el dióxido de carbono alcanzó el 75% manteniendo esta participación desde los años anteriores recientes.

Como se apuntaba, a principios del periodo de análisis el metano tenía una participación alrededor del 76% para luego descender y llegar a un punto poco antes del siglo XX dónde su contribución porcentual se ubicaría por debajo de la participación del CO<sub>2</sub>, este

descenso ha continuado hasta llegar a un 15% en los años actuales. En cuanto a las emisiones óxido nitroso y gases fluorados, estas se han mantenido relativamente estables en su participación porcentual por debajo del 10 y el 3% respectivamente. En el año 2022, el N<sub>2</sub>O y los gases F representaron 6.46 y 2.67 del total porcentual respectivamente.

En la siguiente sección se muestran las emisiones por tipo de actividad económica y su contribución porcentual.

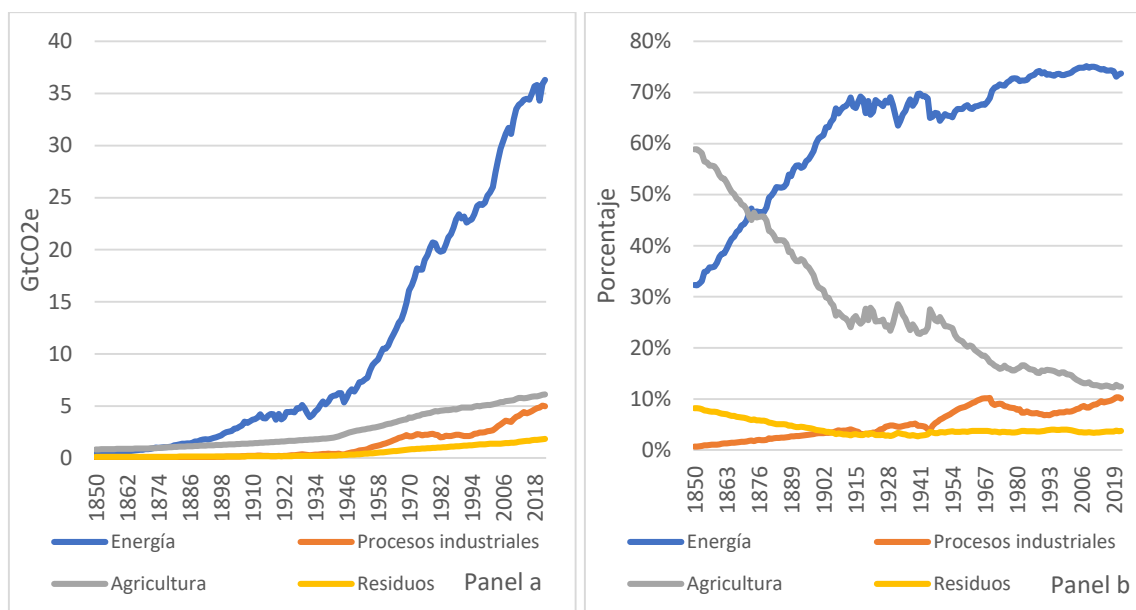
### 2.2.3 Emisiones por sector

En la sección 2.2.1 se conocieron de manera cualitativa cuales son las principales actividades humanas que generan a los gases de efecto invernadero, en esta sección por medio del conjunto de datos del PIK se muestran de manera cuantitativa las emisiones de GEI medidas en gigatoneladas y en participación porcentual. De acuerdo con el PIK, las actividades humanas que genera GEI pueden agruparse en: energía, agricultura, procesos industriales y residuos.

La figura 6 muestra cuantas son las gigatoneladas que se han emitido como producto de estas actividades (panel a) y en qué porcentaje han contribuido desde el año 1850 hasta el año 2022. Al igual que en las emisiones por tipo de gas resaltaba que el total de ellas se debía mayoritariamente a la contribución del CO<sub>2</sub>, en esta figura resalta también que la mayor cantidad de emisiones se encuentra concentrada en una solo actividad humana: el uso de energía.



Figura 6 GEI por actividades económicas, 1850 – 2022 (GtCO<sub>2</sub>e).



Fuente: Elaboración propia con datos de Gütschow & Pflüger (2023).

En el panel a, se observa con claridad que las actividades relacionadas con la energía han crecido exponencialmente desde los años alrededor de 1950, nuevamente, estas actividades se habían mantenido por debajo de las 5 GtCO<sub>2</sub> a mediados de la década de 1930, sin embargo, a partir de la década de 1940, sus emisiones crecieron significativamente, por ejemplo, tan solo en la década de 1960 a 1970 las emisiones de la energía aumentaron de 10.5 a 16.1 GtCO<sub>2</sub>e, lo que representa un crecimiento del 53.33%, en la década del 2000 al 2010 el crecimiento registrado fue de 28.96% al incrementar de 25.2 a 32.5 Gt, en los años más recientes (2010 a 2022), las emisiones energéticas incrementaron de 32.5 a 36.3, es decir un 11.69%.

En cuanto a las emisiones relacionadas con la agricultura, sus emisiones se mantuvieron por debajo de las 5 GtCO<sub>2</sub>e hasta el año 1996, cuando alcanzaron la cifra de 5.01 GtCO<sub>2</sub>e, para el año 2022 sus emisiones alcanzaron las 6.1 GtCO<sub>2</sub>e lo que representó un crecimiento del 21.75%. En el caso de las emisiones relacionadas con los residuos, su

mayor crecimiento se observa para los años cercanos a 1970, y nuevamente a principios de la década del 2000, incrementado de 1.3 a 4.9 GtCO<sub>2</sub> para el año 2022, traduciéndose este incremento en 276.92%.

En el panel b, se muestran los porcentajes de estas actividades, y nuevamente, la correlación inversa de la figura 7 aparece en este panel, ahora presentándose entre las actividades relacionadas con la energía y las actividades relacionadas con la agricultura. Desde inicios del año de análisis se observa que a medida que el porcentaje de emisiones atribuidas a la agricultura disminuyen, por el contrario, las emisiones relacionadas con la energía ganan terreno produciendo un cambio en las proporciones respecto del total.

De 1850 hasta mediados de 1870 la actividad con mayores emisiones de GEI era la agricultura con casi el 60% respecto del total en comparación con un 32% de la energía, sin embargo, en los años cercanos a 1875 esta proporción se invirtió, posicionándose la participación de la energía con el mayor porcentaje con alrededor del 45% desde entonces, hasta completar en la actualidad un 74% del total de las emisiones.

En cuanto a las emisiones generadas por los procesos industriales han tenido su contribución más alta en los años cercanos a 1970 y 2020 con un porcentaje alrededor del 10% para ambos casos. Por otro lado, las emisiones correspondientes a los residuos han disminuido respecto del total hasta la época actual desde un 8% a inicios del periodo hasta un 4% para los años cercanos a 2022.

Ahora bien, basados en las observaciones anteriores se afirma lo siguiente:

- Las emisiones de gases de efecto invernadero han aumentado exponencialmente a partir de los años de 1950, alcanzando en el año 2022, las 49.35 gigatoneladas de CO<sub>2</sub> equivalente.

- Las emisiones de CO<sub>2</sub> son mayoritariamente las más abundantes de los GEI identificados, con cantidades superiores a las 35 Gt en los años cercanos a 2022, es decir, su participación porcentual se ubica en alrededor del 75% del total para estos años.
- Existe una correlación negativa entre las emisiones de dióxido de carbono y las emisiones metano.
- Las actividades relacionadas con la energía son las responsables de la mayor generación de gases de efecto invernadero por lo menos desde la década de 1870 hasta la actualidad.
- Existe una correlación negativa entre las emisiones generadas a partir de la energía y las emisiones generadas a partir de la agricultura.
- Por deducción se podría afirmar entonces que el CO<sub>2</sub> es generado a partir de las actividades relacionadas con la energía.
- El CH<sub>4</sub> es el segundo GEI con mayores emisiones anuales de CO<sub>2</sub> equivalente alcanzando un 15% del total en el año 2022.
- Las emisiones por óxido nitroso y gases fluorados representan actualmente el 6.46 y el 2.67% de total de los GEI actualmente (año 2022).
- Las emisiones por actividades relacionadas con los procesos industriales representan el 10% actualmente. Se debe recordar que actividades de procesos industriales en las figuras anteriores se refiere a actividades específicas como la producción de cemento y productos químicos o petroquímicos que generan algún tipo de GEI derivado directamente de su proceso de obtención.
- Las emisiones por los residuos contribuyen con el 4% del total de GEI actualmente manteniéndose con relativamente estable ese porcentaje en las últimas décadas.

- Las crisis económicas como las originadas por la primera guerra mundial, la gran depresión, la segunda guerra mundial, la crisis del petróleo en los 1970 y 1980, la crisis financiera de 2009 y la pandemia por covid-19 disminuyeron apenas en el corto plazo el crecimiento de las emisiones, ya que posteriormente estas retomaron su trayectoria de incrementos continuos.
- Finalmente, el análisis gráfico confirma dos momentos en el periodo analizado a partir de los cuales se incrementaron significativamente las emisiones de GEI a nivel global, estos serían, los años de 1870 y los años de 1950.

Sobre este último punto, si bien es cierto se han hecho algunas observaciones importantes de las figuras 4,5 y 6, a continuación, es importante complementar el análisis con algunas explicaciones históricas que nos ayuden a entender el comportamiento de los drásticos incrementos de las emisiones GEI lideradas por el CO<sub>2</sub> y las actividades de relacionadas con la energía. Nos preguntamos puntualmente ¿Qué fue lo que sucedió en estos dos momentos que marcaron el drástico incremento de las emisiones en el mundo?

La respuesta a esta pregunta se encontró en los sucesos de la historia económica recopilados por Rondo Cameron y Larry Neal en su influyente obra "*Historia económica mundial: desde el paleolítico hasta el presente*". Veamos esta explicación.

De acuerdo con Cameron y Neal (2005), el siglo XIX presenció el triunfo definitivo del industrialismo como modo de vida especialmente en Europa Occidental. Desde sus inicios en Gran Bretaña, la industria moderna se extendió por el Canal de la Mancha y el Mar del Norte hasta Bélgica, Francia, Alemania y otros países europeos, y por el Atlántico hasta Estados Unidos. Este proceso alteró considerablemente las condiciones de vida y de trabajo en las regiones afectadas. Las transformaciones variaron de una región a otra y de un país a otro, en función de las circunstancias locales y del momento en que comenzó la

industrialización, siendo los determinantes básicos las grandes tendencias generales en materia de población, recursos, tecnología e instituciones.

## Población

La población mundial se duplicó aproximadamente cada mil años desde la invención de la agricultura hasta finales del siglo XVIII. En el siglo XIX, la población de Europa se duplicó en menos de cien años, y en el siglo XX incluso había superado este ritmo para el conjunto de la población mundial. El crecimiento demográfico también se vio influido por las migraciones interiores y exteriores, estimuladas a su vez por los medios de transporte baratos: entre 1815 y 1914, unos 60 millones de personas abandonaron Europa.

Entre 1815 y 1914, unos 60 millones de personas abandonaron Europa, de los cuales casi 35 millones se fueron a Estados Unidos y 5 millones a Canadá. Entre 12 y 15 millones de personas se fueron a América Latina, principalmente a Argentina y Brasil. Australia, Nueva Zelanda y Sudáfrica representaron la mayor parte del resto. Las Islas Británicas (incluida Irlanda) aportaron el mayor número de emigrantes, unos 18 millones.

## Recursos

La Europa industrial no experimentó ningún crecimiento prodigioso en la cantidad o calidad de sus recursos naturales en comparación con la Europa preindustrial, pero como resultado del cambio tecnológico y de la presión de la creciente demanda, recursos antes desconocidos o de escaso valor adquirieron de repente una importancia enorme, incluso crucial. Esto fue especialmente cierto en el caso del carbón, y las regiones de Europa con abundantes yacimientos de este mineral se convirtieron en las capitales de la industria pesada en el siglo XIX. Las regiones sin carbón tuvieron que importarlo, sin dejar de depender, por supuesto, de sus fuentes tradicionales de agua y energía eólica. A finales del siglo XIX, con la introducción de la hidroelectricidad, las regiones con abundancia de

ella, como Suiza, partes de Francia, Italia y Suecia-Noruega, adquirieron una nueva fuente de energía de valor comparable.

#### Desarrollo y difusión de la tecnología

Este fue quizá el principal factor determinante del cambio industrial en los siglos XVIII y XIX. Durante el siglo XVIII, e incluso en la primera mitad del XIX, los conocimientos científicos como tales sólo se aplicaron de forma limitada a los procesos de producción económica. El periodo de la historia de la tecnología comprendido entre principios del siglo XVIII y 1860 o 1870 se considera la época del artesano-inventor. A partir de entonces, sin embargo, las teorías científicas fueron constituyendo cada vez más la base de los procesos de producción, sobre todo en industrias nuevas como la electricidad, la óptica y la química orgánica, pero también influyeron considerablemente en los avances técnicos de la metalurgia, la producción de energía, la transformación y conservación de alimentos y la agricultura, por citar sólo los ámbitos más importantes.

Este apartado se trata con más detalle en el capítulo siguiente, pero ya conviene señalar que el desarrollo tecnológico ha repercutido en cuatro aspectos de gran importancia para la industria moderna: el aumento de la fuerza motriz y la producción de energía, el abaratamiento del acero, el desarrollo del transporte y las comunicaciones y, en general, la aplicación más avanzada de la ciencia. Todos estos elementos están interrelacionados.

Por ejemplo, el desarrollo de la lámpara eléctrica incandescente entre 1878 y 1880, logrado casi simultáneamente por Joseph Swan en Inglaterra y Thomas Alva Edison en Estados Unidos, dejó obsoleta la iluminación por arco e inauguró una nueva era en la industria eléctrica. Durante varias décadas, la electricidad compitió estrechamente con otras dos fuentes de iluminación recientemente perfeccionadas: el gas de hulla y la parafina. La

electricidad tiene muchas otras aplicaciones. Es una de las formas de energía más versátiles.

En 1879, el mismo año en que Edison patentó su lámpara eléctrica, el alemán Werner von Siemens inventó el trolebús o tranvía eléctrico, que tuvo consecuencias revolucionarias para el transporte de masas en las crecientes metrópolis de la época. En pocos años, los motores eléctricos habían encontrado decenas de aplicaciones industriales, y los inventores ya empezaban a pensar en los electrodomésticos. La electricidad también podía utilizarse para producir calor, lo que significaba que podía emplearse para fundir metales, en particular el recién descubierto aluminio.

Fue también en esta época cuando hizo su aparición otro combustible: el petróleo. El petróleo, otra importante fuente de energía, apareció en la segunda mitad del siglo XIX. Aunque ya se conocía y utilizaba gracias a descubrimientos accidentales, su explotación comercial comenzó con la perforación del pozo Drake en Titusville, Pensilvania, en 1859. Al igual que la electricidad, el petróleo líquido y su derivado, el gas natural, se utilizaron por primera vez como fuentes de iluminación.

#### El marco institucional

El desarrollo económico puede tener lugar en diversos entornos institucionales. Sin embargo, determinados entornos sociales y jurídicos, así como ciertos entornos naturales, son más propicios al progreso material que otros. El marco institucional de la actividad económica en la Europa del siglo XIX, que dio origen a la primera civilización industrial, daba un margen considerable a la iniciativa y la empresa individuales, permitía la libre elección de ocupación y la movilidad geográfica y social, se basaba en la propiedad privada y el Estado de Derecho, y hacía hincapié en el uso de la racionalidad y la ciencia en la persecución de objetivos materiales. Ninguno de estos elementos era totalmente nuevo en

el siglo XIX, pero su yuxtaposición y reconocimiento explícito los convirtieron en poderosos contribuyentes al proceso de desarrollo económico.

#### Milagros económicos» tras la Segunda Guerra Mundial

El cuarto de siglo que siguió a la Segunda Guerra Mundial se caracterizó por el periodo más largo de crecimiento ininterrumpido en los países industrializados del mundo, y las tasas de crecimiento fueron las más altas de la historia. Tomando los países industrializados como grupo (OECD, EE.UU., Canadá y Japón), el crecimiento medio del producto nacional bruto por trabajador entre 1950 y 1973 fue del 4,5% anual. Las tasas de crecimiento específicas de cada país oscilaron entre el 2,2% del Reino Unido y el 7,3% de Japón. El crecimiento fue más rápido en los países con abundante mano de obra, bien por la reducción de la población agrícola (Japón, Italia, Francia), bien por la afluencia de refugiados (Alemania Occidental).

En Estados Unidos, Canadá y Gran Bretaña, donde la renta per cápita era más elevada al final de la guerra, el crecimiento fue más lento que en Europa Occidental continental y Japón, pero más rápido que en cualquier periodo anterior de su historia. Al mismo tiempo, los países con una renta per cápita relativamente baja dentro del grupo industrial (Italia, Austria, España, Grecia y Japón) experimentaron un crecimiento superior a la media. El término «milagro económico», como ya se ha mencionado, se aplicó por primera vez al notable esfuerzo de crecimiento de Alemania Occidental tras la reforma monetaria de 1948.

Cuando las altas tasas de crecimiento se mantuvieron a lo largo de las décadas de 1950 y 1960, el término se utilizó a menudo para referirse al conjunto del periodo. Entonces se observó que otros países, sobre todo Italia y Japón, tenían tasas de crecimiento tan elevadas o incluso superiores a las de Alemania. ¡Los milagros abundan! ¿O no? Las elevadas tasas de crecimiento de la mayoría de los países industrializados fueron



ciertamente notables, sin precedentes en la historia, pero desde luego no fueron milagrosas. En cada caso, hubo razones sólidas para ello. La ayuda estadounidense desempeñó un papel crucial para encender la chispa de la recuperación. A continuación, los europeos la apoyaron con elevados niveles de ahorro e inversión.

Gran parte de la inversión se destinó a la compra de equipos para nuevos productos y procesos. Durante los años de depresión económica y guerra, se habían acumulado innovaciones tecnológicas a la espera de ser aprovechadas por el capital y la mano de obra cualificada.

En resumen, de manera general lo que aceleró el crecimiento de las emisiones de GEI fue el mayor consumo energético necesario para un mayor crecimiento económico a nivel mundial y lo que aceleró el crecimiento a nivel mundial fueron una serie de factores entre los que destacan principalmente, el aumento en la demanda de bienes y servicios, mayor explotación de recursos, el desarrollo e implementación de nuevas tecnologías y los marcos legales que estimulaban el crecimiento económico (Comín, 2014).

#### 2.2.4 Actividades económicas que generan gases de efecto invernadero

Hasta este momento se han identificado a nivel agregado, los sectores responsables de las emisiones de GEI mundial, con la finalidad de complementar de desagregar la contribución de los sectores, se presenta la tabla 1 elaborada a partir de los datos de la Agencia Internacional de Energía (IEA) y extraídos por el Instituto de los Recursos Mundiales (WRI) para el año 2018, esta tabla muestra las ramas o actividades específicas del sistema económico que son responsables del total de las emisiones de GEI. Su contribución está expresada en términos porcentuales donde 48.03 GtCO<sub>2</sub>e corresponde al 100%.

Tabla 1. Emisiones de GEI por sector, subsector y rama en el año 2018 (48.03 GtCO<sub>2</sub>e = 100%).

Sector	Subsector	Rama o industria	Participación
Energía 73.2%	Transporte 16.2%	Carretero	11.90%
		Aviación	1.90%
		Ferrocarril	0.40%
		Oleoducto	0.30%
		Marítimo	1.70%
	Energía en edificios (electricidad y calor) 17.5%	Residencial	10.90%
		Comercial	6.60%
	Energía en la industria 24.2%	Hierro y acero	7.20%
		Metales no ferrosos	0.70%
		Maquinaria	0.50%
Alimentación y tabaco		1%	
Papel, pasta e imprenta		0.60%	
Química y petroquímica (energía)		3.60%	
Otras industrias		10.60%	
Energía en la agricultura y la pesca 1.7%	Energía en la agricultura y la pesca	1.70%	
	Quema de otros combustibles 7.8%	Combustión de otros combustibles	7.80%
Emisiones fugitivas de la energía 5.8%	Carbón	1.90%	
	Petróleo y gas natural	3.90%	
Agricultura, silvicultura y uso de la tierra (AFOLU) 18.4%	Ganadería y estiércol 5.8%	Ganadería y estiércol	5.80%
	Cultivo del arroz 1.3%	Cultivo del arroz	1.30%
	Suelos agrícolas 4.1%	Suelos agrícolas	4.10%
	Quema de cultivos 3.5%	Quema de cultivos	3.50%
	Tierras forestales 2.2%	Tierras forestales	2.20%
	Tierras de cultivo 1.4%	Tierras de cultivo	1.40%
	Pastizales 0.1%	Pastizales	0.10%
Procesos industriales 5.2%	Cemento 3%	Cemento	3%
	Química y petroquímica (industrial) 2.2%	Química y petroquímica (industrial)	2.20%
Residuos 3.2%	Vertederos 1.9%	Vertederos	1.90%
	Aguas residuales 1.3%	Aguas residuales	1.30%

Fuente: Elaboración propia con datos de Ge et al. (2021).

Como se ha visto, el consumo de energía es, por mucho, la mayor fuente de emisiones añadidas de gases de efecto invernadero. Este sector es responsable de un 73.2% de las

emisiones globales, e incluye a los subsectores (en orden descendente de contribución): consumo de energía en la industria (24.2%), consumo de energía en edificios (17.5%), transporte (16.2%), quema de otros combustibles (7.8%), emisiones fugitivas de la energía (5.8%) la energía para la agricultura y pesca (1.7%). Dentro del subsector del consumo de energía industrial, las industrias que más contribuyen son la del hierro y el acero que emite el 7.2% del total y la industria química y petroquímica con el 3.6% del total. En el subsector de energía en edificios, el consumo residencial contribuye con el 10.9% mientras que el comercial 6.6%.

El subsector del transporte contribuye con el 16.2% dentro del cual el transporte carretero es el principal emisor de GEI con un 11.9%, seguido de la aviación y el marítimo con un 1.9% y 1.7% respectivamente. El subsector referido a la quema de otros combustibles (los diferentes al carbón, petróleo y gas) produce el 7.8% de las emisiones, mientras que el subsector de emisiones fugitivas de los tres principales combustibles fósiles, generan en conjunto el 5.8% de los GEI. Finalmente, las contribuciones por el consumo de energía se completan por la aportación de la energía utilizada en la agricultura y pesca con un 1.7%.

El segundo sector con mayores emisiones globales de GEI, es el llamado sector AFOLU que son las siglas en inglés para agricultura, silvicultura y uso de suelo (también se ha creado una categoría llamada "LULUCF" que contabiliza las emisiones del uso del suelo y del cambio de uso del suelo y la silvicultura, sin embargo, esta categoría es discutida y en diversos conjuntos de datos suele no incluirse debido a la dificultad de separar plenamente estas emisiones de las que ya se han asignado a la agricultura) el cual contribuye con 18.4%, dónde la ganadería y el estiércol generan el 5.8%, seguida del uso de suelo agrícola con 4.1%, la quema de cultivos con 3.5%, el manejo de tierras forestales 2.2%, manejo de tierras de cultivo 1.4%, el cultivo de arroz 1.3% y los pastizales con 0.1%.

El tercer sector en generación de emisión es el de procesos industriales (como dijimos, las emisiones de este sector no deben confundirse con las emisiones que genera todo el sector industrial por el uso de la energía, esta clasificación se refiere a industrias y productos específicos que emiten ciertos gases como parte de su proceso de transformación en sí), el cual contribuye con el 5.2% total, de los cuales el 3% se debe a la producción de cemento y 2.2% derivado de productos químicos y petroquímicos.

El cuadro se completa por las emisiones generadas de los residuos con 3.2% dividido entre los GEI producidos en vertederos con 1.9% y los producidos por las aguas residuales con 1.3%. De esta manera, se tiene el panorama general suficiente para que los investigadores abran líneas de investigación específicas en torno a las relaciones entre el fenómeno del cambio climático y la actividad económica. En lo referente a este trabajo, debido a que se ha identificado al CO<sub>2</sub> como el GEI de mayor contribución a este fenómeno, en los siguientes capítulos se estudia con mayor profundidad en relación con el crecimiento económico de México.

## 2.3 CO<sub>2</sub> y crecimiento económico en México

### 2.3.1 Las emisiones de CO<sub>2</sub> en México

En esta sección se presenta el comportamiento gráfico de las variables estudiadas. La sección inicia con la tabla 2, la cual muestra los mayores países emisores de CO<sub>2</sub> clasificados por el total de GtCO<sub>2</sub> acumuladas durante el periodo de 1950 a 2022.

Tabla 2. Mayores países emisores de CO2 acumulado de 1950 a 2022 (GtCO2).

<b>País</b>	<b>Acumulado</b>	<b>% Relativo</b>	<b>% Acumulado</b>
<b>Mundo</b>	1561.47	100.00%	100.00%
<b>Estados Unidos</b>	346.29	22.18%	22.18%
<b>China</b>	270.62	17.33%	39.51%
<b>Rusia</b>	119.94	7.68%	47.19%
<b>Alemania</b>	67.22	4.30%	51.49%
<b>Japón</b>	65.29	4.18%	55.68%
<b>India</b>	58.67	3.76%	59.43%
<b>Reino Unido</b>	42.08	2.69%	62.13%
<b>Ucrania</b>	32.72	2.10%	64.22%
<b>Canadá</b>	30.02	1.92%	66.15%
<b>Francia</b>	28.82	1.85%	67.99%
<b>Italia</b>	24.53	1.57%	69.56%
<b>Polonia</b>	23.30	1.49%	71.05%
<b>Irán</b>	22.12	1.42%	72.47%
<b>México</b>	21.22	1.36%	73.83%

Fuente: Elaboración propia con datos de Gütschow et al. (2016) y Gütschow & Pflüger (2023).

Estados Unidos se ubica como el mayor emisor de CO2 acumulando un total de 346.29 GtCO2, lo que representa una participación con respecto del total de 22.18%. China es el segundo país de mayores emisiones de CO2 acumuladas con un total de 270.62 GtCO2 y una participación relativa de 17.33%, en conjunto Estados Unidos y China acumulan el 39.51% del total de CO2 emitido desde 1950 a 2022, es decir, en los últimos 77 años más de una tercera parte de las emisiones mundiales de este GEI corresponden solo a estos países.

En el tercer y cuarto lugar de la clasificación se encuentran Rusia y Alemania con un total acumulado de 119.94 y 67.22 GtCO2 respectivamente y una participación relativa de 7.68% y 4.30%. Al sumar las participaciones individuales de Estados Unidos, China, Alemania y

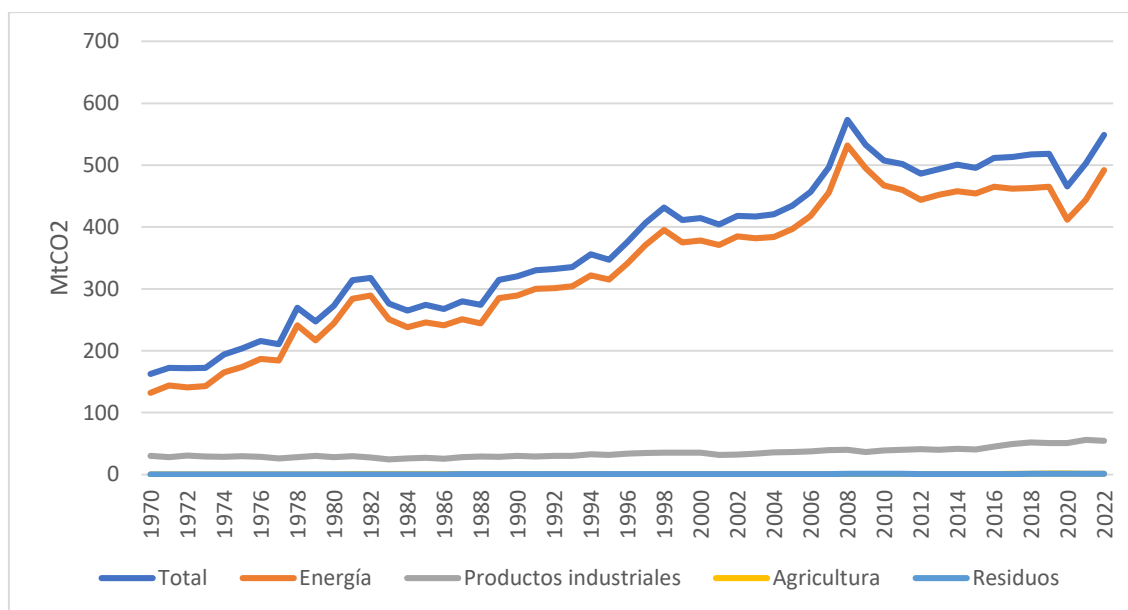
Rusia podemos que notar que estos cuatro países han emitido más de la mitad del CO<sub>2</sub> acumulado, concretamente han emitido el 51.49% del total de CO<sub>2</sub> en los últimos 72 años.

En el mismo orden sigue, Japón con 65.29 GtCO<sub>2</sub> y 4.18% de participación relativa, India con 58.67 GtCO<sub>2</sub> y 3.76% de participación relativa, Reino Unido con 42.08 GtCO<sub>2</sub> y 2.69% de participación relativa, Ucrania con 32.72 GtCO<sub>2</sub> y 2.10% de participación relativa, Canadá con GtCO<sub>2</sub> 30.02 y 1.92% de participación relativa, Francia con 28.82 GtCO<sub>2</sub> y 1.85% de participación relativa, Italia 24.53 con GtCO<sub>2</sub> y 1.57% de participación relativa, Polonia con 23.30 GtCO<sub>2</sub> y 1.49% de participación relativa e Irán 22.12 con GtCO<sub>2</sub> y 1.42% de participación relativa.

Finalmente, México se ubica en el puesto número catorce con un total de 21.22 gigatoneladas de CO<sub>2</sub> acumulado, lo que representa el 1.36% del total de las emisiones durante el periodo de 1950 a 2022. Para tener una perspectiva de la diferencia que existe con el mayor emisor que es Estados Unidos, en términos absolutos es de 325.07 GtCO<sub>2</sub> acumulados, en términos porcentuales la participación de México representa apenas el 6.12% del total que Estados Unidos ha emitido durante este periodo.

A continuación, en la figura 7 se presentan las emisiones totales de CO<sub>2</sub> en México desde 1970 a 2022, en el mismo gráfico, se incluyen las emisiones correspondientes a las generadas por el uso de energía, productos industriales, residuos y agricultura. Los valores se presentan en megatoneladas (millones de toneladas) métricas de CO<sub>2</sub>.

Figura 7 Emisiones de CO2 mexicanas y por actividad económica, 1970 – 2022 (MtCO2).



Fuente: Elaboración propia con datos de Gütschow et al. (2016) y Gütschow & Pflüger (2023).

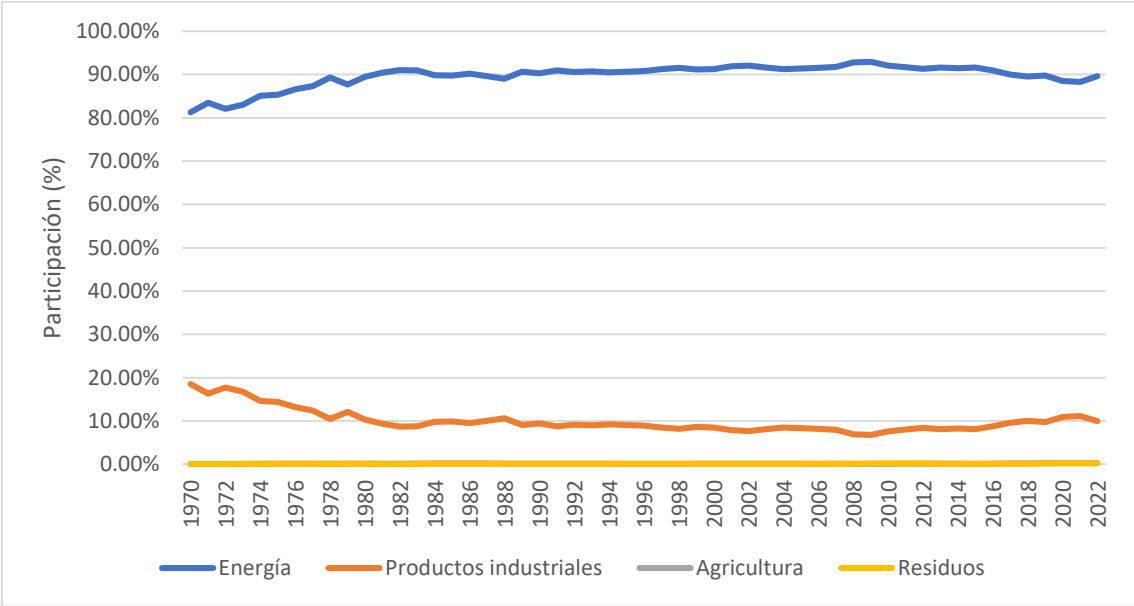
De 1970 a 2022, las emisiones totales de CO2 en México incrementaron de 162.4 MtCO2 a 549.04 MtCO2 durante el periodo, es decir, incrementaron en más de 338% lo que significa una tasa de crecimiento promedio anual de 6.5% (tomando en cuenta el valor inicial y el final, si se consideran las variaciones anuales, la tasa promedio de crecimiento es de 2.60%).

El mayor pico de emisiones se observa en el año 2008 con 573.36 MtCO2, este pico es interesante el contexto de la CAK y es que en los años posteriores no se ha observado nuevamente este nivel de CO2, de hecho, en los años posteriores las emisiones disminuyeron a niveles por debajo de las 500 MtCO hasta el año 2016 que se emitieron 511.42 MtCO2, a partir de ese año, las emisiones se mantuvieron relativamente estables hasta el año 2020 en que derivado de la pandemia disminuyeron a 465.61 MtCO2,

finalmente en los últimos tres años las emisiones han incrementado nuevamente alcanzando las 549.04 MtCO<sub>2</sub> en el año 2022.

Por otro lado, se muestra que del total de emisiones estas se derivan de las actividades generadoras de energía. En la figura 9, se puede observar que la actividad energética genera alrededor del 90% del total de las emisiones de CO<sub>2</sub> en México, con un total para el año 2022 de 492 MtCO<sub>2</sub>, le siguen las emisiones generadas por los productos industriales con alrededor del 10% del total, en el año 2022 su nivel alcanzado fue de 54.6 MtCO<sub>2</sub>.

Figura 8. Participación de las actividades generadoras de CO<sub>2</sub> en México, 1950 a 2022 (%).



Fuente: Elaboración propia con datos de Gütschow et al. (2016) y Gütschow & Pflüger (2023).

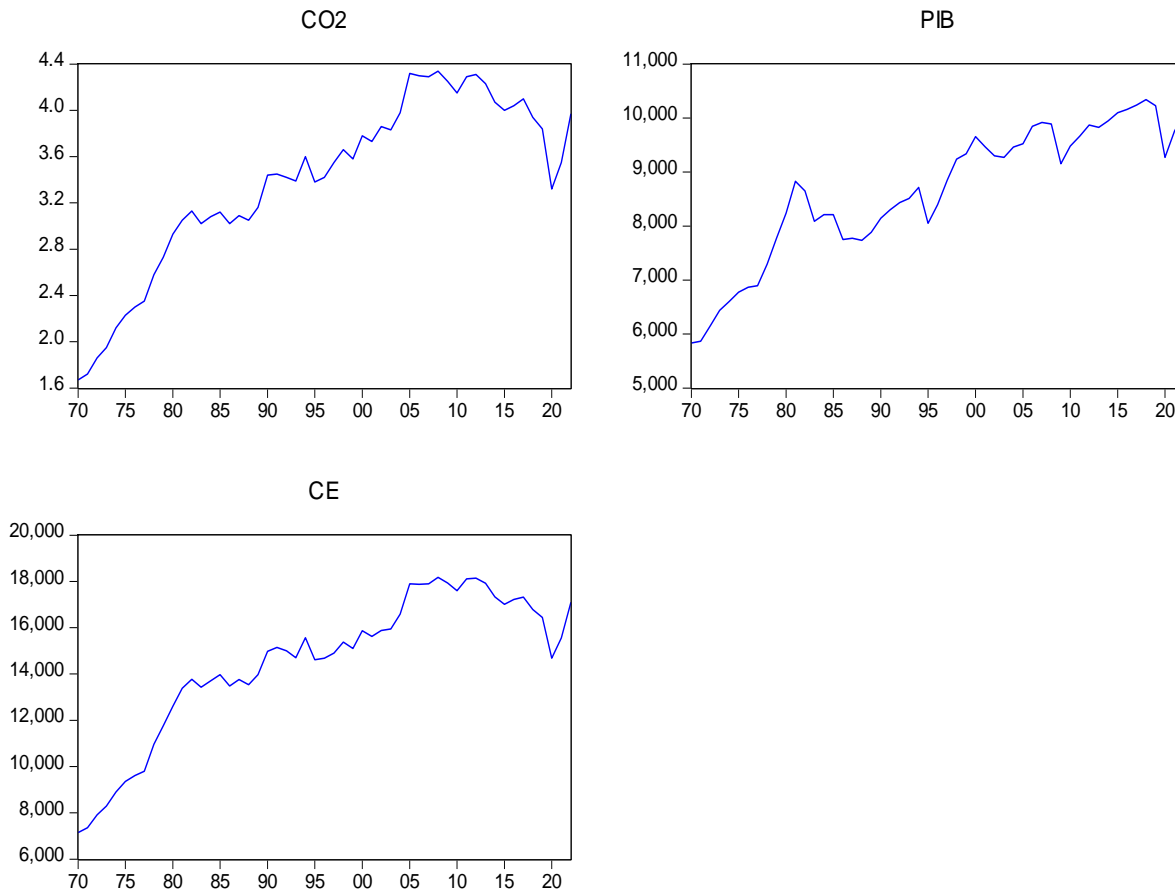
Finalmente, las emisiones de la agricultura y los residuos representan menos del 1% del total de las emisiones, con un total de 1.4 y 1.05 MtCO<sub>2</sub> para el año 2022.



### 2.3.2 Emisiones de CO2, Producto Interno Bruto y consumo de energía fosil.

En la figura 9, se analiza el comportamiento de las emisiones de CO2, el Producto Interno Bruto y el consumo de energía (CE) en México durante el periodo de 1970 a 2022, todas las variables se presentan en términos per cápita de: toneladas, dólares estadounidenses a precios constantes de 2010 y kilovatios hora (KWh) respectivamente. Es importante señalar, que en la figura se analiza en conjunto estas tres variables debido a que las emisiones de CO2 se producen en un 90% por la generación energética, a su vez el uso de energía se distribuye en actividades clave de la actividad económica. Por lo tanto, hablar de CO2 en realidad es hablar de actividad económica y consumo de energía en su conjunto.

Figura 9. CO2, PIB y Consumo de energía per cápita de 1970 a 2022 (toneladas, dólares y KWh)



Fuente: Elaboración propia con datos del Instituto de Energía y Banco Mundial.

La primera observación es la notable similitud entre el comportamiento del CO<sub>2</sub> y el consumo de energía, es claro, que estas dos variables tienen un comportamiento casi idéntico lo que demuestra la gran relevancia que tiene el consumo de energía en el impacto del CO<sub>2</sub>, por otro lado, el comportamiento del PIB, no sigue exactamente el mismo patrón que las variables anteriores, pero si una tendencia compartida al alza.

Ahora bien, se puede observar que alrededor de los primeros 10 años, de 1970 a poco después de 1980, las tres variables presentan un incremento de sus niveles. El CO<sub>2</sub> aumentó de 1.67 toneladas en 1970 a 3.13 toneladas por habitante en 1982, en el caso del PIB aumentó de 5 835.13 a 8 649.12 dólares por habitante en el mismo periodo y en el caso del consumo de energía su uso incremento de 7 151.86 kilovatios-hora en 1970 a 13 768.68 kilovatios-hora en 1982.

De acuerdo con Solís (2000) (citado en (Kehoe et al., 2013)), los primeros años de crecimiento de 1970 a 1976 habrían sido en realidad la continuidad del crecimiento en el periodo conocido como “Desarrollo Estabilizador”, que había iniciado desde 1950 influenciado por las inversiones del Gobierno en infraestructura pública como: la industria del petróleo, carreteras, salud y educación.

Durante los años de 1976 a 1982, el descubrimiento de grandes yacimientos petrolíferos a principios de 1978 tuvo un efecto significativo en la política económica. Entre 1977 y 1978 las reservas probadas de petróleo aumentaron en 151.2%. El gobierno instrumentó un programa de inversión pública dirigido a la expansión de la industria del petróleo. También hubo una expansión de la infraestructura pública y la prestación de servicios de salud pública y educación. Entre 1978 y 1982, la inversión pública y la inversión privada crecieron en términos reales a una tasa de 15% anual (Kehoe et al., 2013, p. 253).

Además, entre 1979 y 1982, se dio un auge petrolero debido a los nuevos descubrimientos y explotación de yacimientos de hidrocarburos como el campo de Cantarell, el crecimiento interno y la entrada de grandes flujos de capital extern. Con este *boom* los resultados comenzaron a reflejarse de manera favorable en la economía nacional (Laureano, 2008).

Los siguientes años de la trayectoria gráfica muestra una caída durante los años del 1982 a 1988, cuando el PIB per cápita pasó de 8 649.12 a 7 735.72 dólares por habitante, el CO<sub>2</sub> y CE per cápita no muestran una disminución, pero si una estabilización de sus niveles que osciló alrededor de las 3.07 toneladas de CO<sub>2</sub> y de 13 663. 46 Kwh de uso de energía per cápitas.

Esta caída y estancamiento de las variables de acuerdo con Ros (2008) se produjo debido a la desaceleración del crecimiento económico caracterizada por fuertes choques externos, una aguda inestabilidad macroeconómica y una continua transferencia de recursos hacia el exterior en el marco de un severo racionamiento del crédito externo. En específico por el déficit del sector público de 17.6% del PIB, el déficit en la cuenta corriente de 4% del PIB y la inflación de 61.0% entre los años de 1981 y 1982. Estos problemas se agravarían en el transcurso de esos años, que incluso la inflación para 1986 y 1987 fue de 141% (Kehoe et al., 2013).

Los años de 1990 a 2000 muestran un comportamiento de contraste, en la primera mitad de la década, el PIB per cápita pasó de 8 145.01 dólares en 1990 a 8 715.73 dólares en 1994 para luego caer nuevamente a 8 049.74 dólares en 1995. Para el año 2000 el PIB per cápita alcanzaría los 9 655.60 dólares. El CO<sub>2</sub> por su parte pasó de las 3.44 toneladas en 1990 a las 3.78 toneladas por habitante el año 2000. Para el caso de consumo de energía, este pasaría de los 14 975.47 Kwh a los 15 866.97 Kwh en el año 2000.

Como se ha mencionado, éste fue un periodo de inestabilidad. Los primeros años de la década de los noventa estuvieron marcados principalmente por el proceso de liberalización del sistema financiero mexicano. De todas las reformas impulsadas por el gobierno, destaca la liberalización del sistema bancario entre 1988 y 1991. Las medidas políticas adoptadas para alcanzar este objetivo incluyeron la eliminación de los requisitos de reserva para los bancos privados y la supresión de las restricciones sobre los tipos de interés tanto para los depósitos como para los préstamos. La reprivatización de 18 bancos entre 1991 y 1992 condujo a la formación de nuevos y poderosos grupos financieros, con un alto grado de concentración, ya que estas nuevas instituciones financieras controlaban más del 50 por ciento de los activos en 1994 (Tinoco-Zermeño et al., 2008).

A principios de los años noventa, el objetivo de estabilizar la economía parecía haberse alcanzado; sin embargo, el gran número de perturbaciones negativas externas e internas condujo a la crisis financiera y de la balanza de pagos que estalló a finales de 1994. Dado el agotamiento relativamente rápido de las reservas internacionales desde principios de 1994, el Banco Central fue incapaz de mantener la paridad cambiaria, por lo que a finales de ese año las autoridades mexicanas decidieron abandonar el régimen de tipo de cambio semifijo dentro de «bandas» y optaron por un nuevo régimen de tipo de cambio flotante, acorde con las fuerzas del mercado (Rodríguez Benavides & López Herrera, 2009).

A inicios de 1995, según Rodríguez Benavides & López Herrera (2009), las perspectivas eran totalmente negativas, dadas las expectativas generalizadas de una nueva recesión y el repudio abierto de los activos financieros mexicanos, tanto públicos como privados, por parte de los inversores internacionales que, cuando las expectativas eran optimistas, los habían adquirido de muy buena gana.

En el campo de la política energética, la administración gubernamental de 1994 a 2000, al interior de Petróleos Mexicanos (PEMEX), desintegró PEMEX Petroquímica, dividiéndose

en empresas filiales, en tanto que en el mundo las decisiones iban en sentido contrario, integrándose las empresas en grandes consorcios petroleros. El sexenio terminó con el Tratado México-Estados Unidos de Delimitación de la Plataforma Continental en el Golfo de México, negociado desde 1996, firmado en junio de 2000 y ratificado por el Senado por unanimidad dos días antes de que terminara la administración (Laureano, 2008).

De acuerdo con Laureano (2008), el tratado dio certeza jurídica a la delimitación de la plataforma continental de México y Estados Unidos en el Golfo, con implicaciones técnicas desfavorables para México, pues el petróleo listo para ser extraído, ubicado a poco más de tres mil metros, quedó bajo la soberanía estadounidense, y del lado mexicano se estimó que pudiera haber hidrocarburos a cuatro mil metros de profundidad.

En la década de los 2000, el CO<sub>2</sub> per cápita fue de 3.78 toneladas en el año 2000, para el año 2008 las emisiones por habitante alcanzaron las 4.34 toneladas por habitante. El PIB por su cuenta fue de 9 655.60 dólares a 9 888.13 dólares por habitante. Por su lado, el CE pasó de 15 866.97 kwh en el 2000 a 18 173.97 kwh de consumo por habitante en el 2008.

Al siguiente año las tres variables registraron caídas en su comportamiento, el CO<sub>2</sub> disminuyó a 4.25 toneladas en 2009 y luego a 4.15 toneladas per cápita en 2010, el PIB disminuyó a 9 151.76 dólares per cápita en 2009 y el consumo de energía a 17 929.12 kilovatios hora. Desde luego, esta caída obedece a la crisis financiera que se inició en Estados Unidos y terminó por afectar a la economía mexicana por vía de los mercados financieros.

De acuerdo con Calderón & Sánchez (2012), parte de la explicación del bajo crecimiento del periodo iniciado desde 1982, obedece a situaciones coyunturales de origen externo y/o interno, como en los primeros años de los ochenta, o como sucedió recientemente con la crisis financiera mundial iniciada en el segundo semestre de 2008. La ralentización obedece

también al crecimiento global, y es de carácter estructural, vinculada plenamente a la falta de vigor en el crecimiento de la producción manufacturera y a la ausencia de cualquier tipo de progreso técnico endógeno; estos son los factores que impedirían que la economía mexicana creciera al ritmo que debería.

La incipiente recuperación del PIB antes de la crisis financiera de 2009 requeriría del aumento del uso de energía que se ve reflejado también en los niveles de CO<sub>2</sub>. El incremento de los precios de los petrolíferos en el mercado interno desde principios del 2000 y la recuperación sostenida de los precios en el mercado internacional a partir de 2002, incidieron en una recuperación muy importante de los ingresos petroleros y, por tanto, de los impuestos correspondientes (Colmenares, 2008).

En estos años, las fuentes del petróleo no serían las únicas que apuntalarían la generación de energía o los ingresos en México, de acuerdo a datos del Instituto de Energía, la generación de energía en México también fue apuntalada por el aumento en el uso de gas natural desde la década de los 2000. En el año 2005, el consumo de gas natural ascendía a los 52.71 mil millones de metros cúbicos y continuaría con un crecimiento acelerado que para el año 2022 ya representaría 96.59 mil millones de metros cúbicos, es decir, su uso incrementó en un 83.24% (Energy Institute, 2024).

El hecho anterior puede representar para México una ventaja hacia descarbonización por petróleo, sin embargo, habrá que estudiar a fondo cuál es el papel del gas natural en las emisiones directas de CO<sub>2</sub> o de otros GEI en México, ya que, si bien es cierto su quema no genera la misma liberación de CO<sub>2</sub>, su principal molécula es el metano, otro de los principales GEI responsables del cambio climático.

En los años de 2010 a 2022, los niveles de CO<sub>2</sub>, PIB y CE per cápita fueron de 4.15 toneladas a 3.97 toneladas, de 9 480.13 dólares a 10 077.38 dólares y de 17 593.86

kilovatios hora a 17 093.92 kilovatios hora respectivamente. Gráficamente este periodo es interesante y podría dar indicio de una desvinculación de crecimiento económico respecto de los niveles de CO2 y del consumo de energía fósil puesto que se observa que los niveles de CE fósil y CO2 han disminuido, pero no así el PIB en términos per cápita.

Entre los acontecimientos más importantes que marcarían la dinámica de este comportamiento, se halla la reforma energética de 2013 (GOBIERNO DE LA REPÚBLICA, 2013). La reforma energética según la administración sexenal de 2012 a 2018, buscaba entre sus objetivos más relevantes:

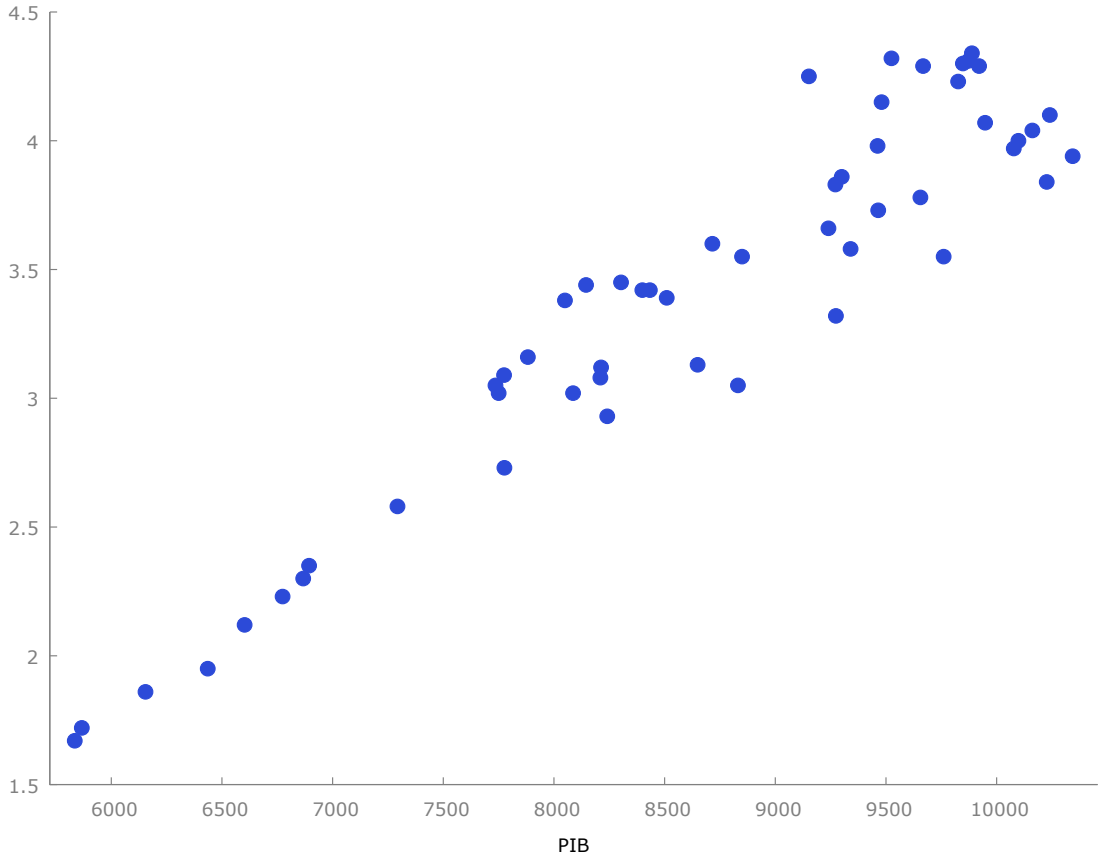
- Modernizar y fortalecer, sin privatizar, a Pemex y a la Comisión Federal de Electricidad como Empresas Productivas del Estado 100% mexicanas.
- Reducir la exposición del país a los riesgos financieros, geológicos y ambientales en las actividades de exploración y extracción de petróleo y gas.
- Permitir que la Nación ejerza, de manera exclusiva, la planeación y control del sistema eléctrico nacional, en beneficio de un sistema competitivo que permita reducir los precios de la luz.
- Atraer mayor inversión al sector energético mexicano para impulsar el desarrollo del país.
- Garantizar estándares internacionales de eficiencia, calidad y confiabilidad de suministro, transparencia y rendición de cuentas.
- Impulsar el desarrollo con responsabilidad social y proteger al medio ambiente.

Sin embargo, en palabras de Catalán Alonso (2021, p. 78), la política energética del país históricamente ha favorecido la generación de energía mediante la quema de combustibles de origen fósil. Con la reforma energética se generó un cambio en favor del gas natural que al 2018, es el principal energético utilizado para generar 47% de la energía del país, pero

las energías limpias no habían aumentado su participación, por el contrario, ahora sólo contribuyen con 7.3% de la oferta energética (esta variable se presenta más adelante).

Por ultimo, el acontecimiento que marco la caída de las tres variables en 2020 y 2021 fue la pandemia por COVID-19 que obligó a parar prácticamente toda actividad considerada no esencial para las personas, en términos económicos la caída del PIB per cápita fue de 9.31% en 2020, mientras que las emisiones de CO2 y consumo de energía disminuyeron en 13.54 y 10.68% respectivamente. A continuación, la figura 11, presenta el gráfico de dispersión entre las emisiones de CO2 y el PIB per cápita.

Figura 10. Gráfico de dispersión relación CO2-PIB per cápita



Fuente: Elaboración propia.



Se muestra la figura 10, debido a la hipótesis de la curva ambiental de Kuznets que establece que la relación entre la degradación ambiental y el crecimiento económico sigue una trayectoria en forma de U invertida, en este caso, graficamos las emisiones de CO<sub>2</sub> y el Producto Interno Bruto (en términos per cápita) y observamos de manera preliminar si es que esta relación puede confirmarse mediante los puntos de dispersión.

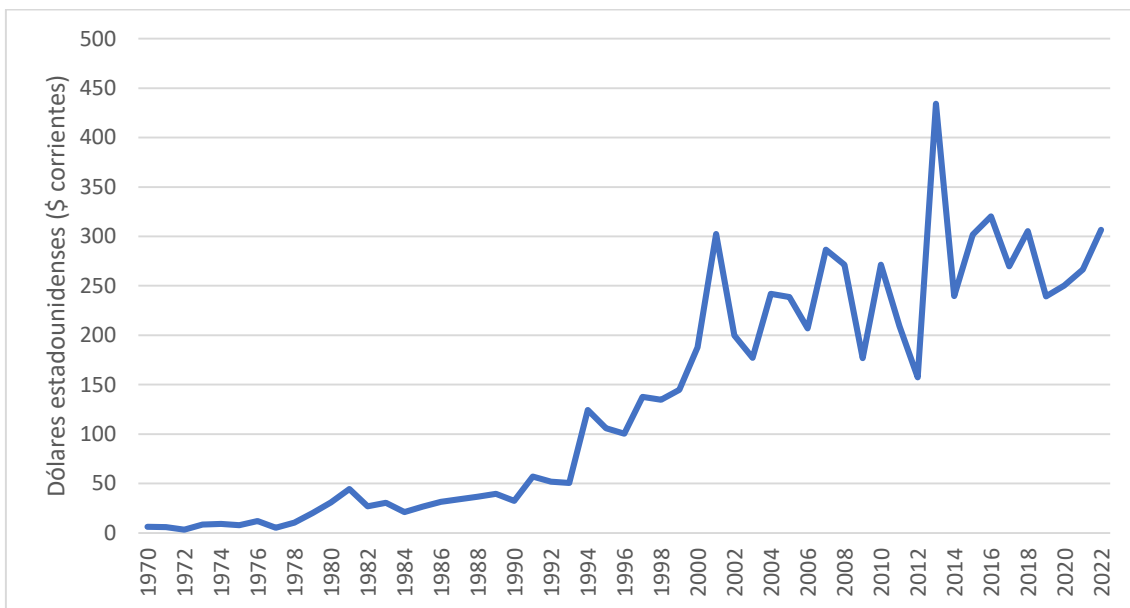
De manera general, si se comparan los puntos de dispersión formados en la figura 11 con la representación de la CAK de la figura 2 presentada en el capítulo uno, no podría sostenerse plenamente que las emisiones de CO<sub>2</sub> han comenzado a descender con respecto del PIB, es decir, tal parece que para el caso de México no se alcanzando el pico máximo de emisiones y mas bien parece una relación monotonica creciente con una correlacion de Pearson 0.9464. En lo que respecta a la caída del CO<sub>2</sub> por habitante de la figura 10 que iniciaría alrededor del año 2013 por la reforma energética, tal caída no se muestra claramente en los puntos de dispersión debido a las disminuciones importantes en los años por pandemia COVID-19 que presentó el PIB en los 2020 y 2021 respecto a los niveles pre-pandemia.

Si preguntamos cual es el panorama de los últimos años, los datos muestran que los niveles de CO<sub>2</sub> y PIB aumentaron a 3.55 toneladas y 9 760.45 dólares en 2021 y a 3.97 toneladas y 10 077.38 dólares respectivamente en 2022. Por lo tanto, de continuar este comportamiento, el punto inflexión del CO<sub>2</sub> en México no podría vislumbrarse en el corto plazo. Por otro lado, para ofrecer una mayor explicación cuantitativa de la relación CO<sub>2</sub>-PIB en el capítulo cinco se desarrolla la técnica ARDL con prueba de límites para cointegración que tiene la capacidad de modelar tanto la dinámica de corto como de largo plazo y de esta forma ofrecer una respuesta mejor fundamentada de la trayectoria del CO<sub>2</sub> en México con respecto del PIB y otros regresores subyacentes importantes como la inversión extranjera directa, el consumo de energía y el consumo de energía renovable.

### 2.3.3 Flujos de inversión extranjera directa en México

En esta sección, se describe el comportamiento la inversión extranjera directa (IED) presentándolo en la figura 11, en dólares per cápita a precios corrientes durante el periodo de 1970 a 2022. Esta variable es relevante debido a la importancia que la IED tiene para México, además de que su modelado es crucial para demostrar si existe o no un paraíso de contaminación en el país estimulado por las inversiones extranjeras.

Figura 11. Flujo de inversión extranjera directa, 1970 a 2022 (\$US precios corrientes).



Fuente: Elaboración propia con datos del Banco Mundial.

De 1970 a 2022 la IED per cápita en México creció de 6.20 a 306.66 dólares por habitante, lo que representa un aumento de 49.46 veces su valor inicial. En términos porcentuales, la tasa de crecimiento promedio en todo el periodo fue 16.26%.

Analizando por periodos específicos se tiene que de 1970 a 1990, la IED per cápita incrementó de 6.20 dólares a 32.23 dólares, con una tasa de crecimiento promedio de 18.78%, para el periodo de 1991 a 2010 la IED pasó de 57.13 dólares a 271.25 dólares, con tasa de crecimiento promedio de 17.63%. Finalmente, para el periodo de 2011 a 2022

la IED per cápita incrementó de 209.32 a 306.66 dólares, con una tasa de crecimiento promedio de 9.78%.

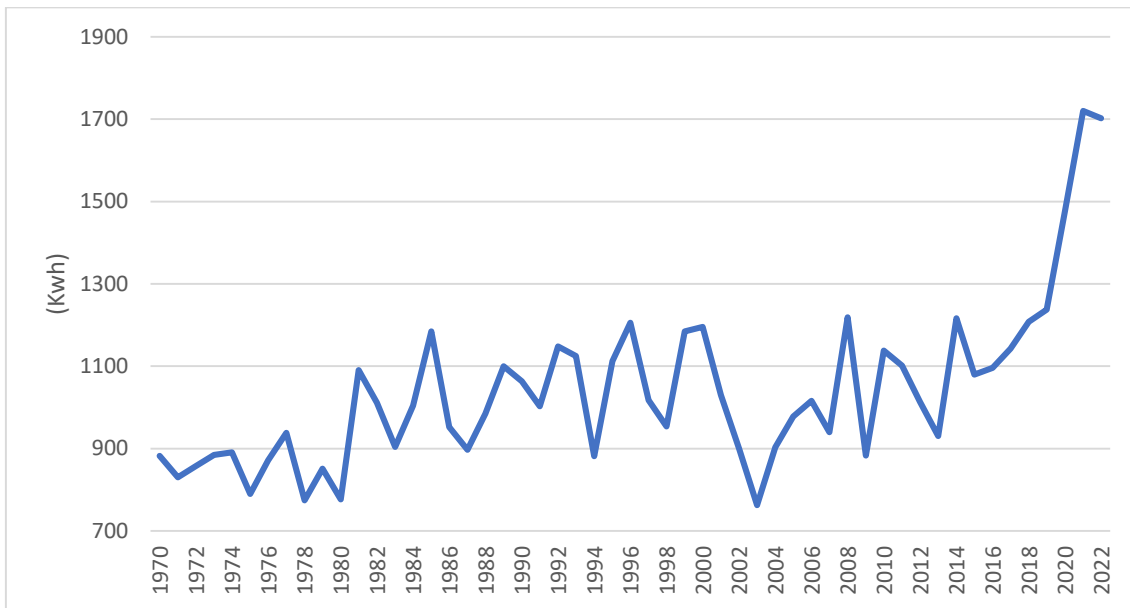
Entre los picos más altos destacan el del año 2001 con una IED de 302.43 dólares por habitante y el año 2013 con una IED de 434.19 dólares por habitante, estos dos valores son explicados en el primer caso, por la compra de Banamex-Accival por 12 mil 447 millones de dólares pagados por Citigroup de Estados Unidos en ese año (CEFP, 2002). En el segundo caso, en el año 2013 el incremento del valor se explica por la venta de Grupo Modelo a la empresa multinacional con sede en Bélgica, Anheuser-Busch InBev (AB-InBev), la principal cervecera a nivel mundial por 20 100 millones de dólares (Martínez Haro & Vargas Hernández, 2013; Vidal, 2018).

En cuanto a la caída más pronunciada del comportamiento de la IED se observa la del año 2012, que estaría explicada por una operación atípica del sector financiero: durante el cuarto trimestre de 2012 Santander España vendió una porción de las acciones que “detentaba” en Santander México a un universo atomizado de inversionistas a través de las bolsas de valores de Nueva York y México, que se reflejó en un registro negativo de IED por 4 106 millones de dólares (SE, 2013).

#### 2.3.4 Consumo de energía renovable

En esta sección se analiza el comportamiento del consumo de energía primaria proveniente de fuentes renovables. De acuerdo con la base de datos utilizada para esta variable, en las energías renovables se incluyen la energía hidroeléctrica, solar, eólica, geotérmica, bioenergía, undimotriz (olas) y mareomotriz (mareas). Sin embargo, en el caso de México la producción de energía renovable se genera principalmente a partir de la energía hidroeléctrica y menos proporción eólica y solar (Ritchie et al., 2024).

Figura 12. Consumo per cápita de energía primaria renovable en México, 1970 a 2022 (KWh).



Fuente: Elaboración propia con datos de Our World in Data.

En el periodo de análisis, las energías renovables destacan por su comportamiento errático si toma el dato inicial de 882.28 kwh de 1970 contra el dato final de 1702.38 kwh de 2022, se diría que el uso de energía renovable en México aumento su nivel en 1.92 veces, es decir, se habría duplicado la cantidad de energía renovable que se consume en el país. Sin embargo, este dato podría dar una idea equivocada del comportamiento general, y es que hasta el año 2019 el uso de estas energías se encontraba en un promedio 1 237.31 kwh, lo que serían los puntos más altos del gráfico a excepción de los años 2020, 2021 y 2022.

En otras palabras, el comportamiento generalizado de las energías renovables de 1970 a 2019 en realidad siguió un promedio de 1 003.27 kwh con una tasa de crecimiento anual de 1.74%, si se considerara todo el periodo, la tasa de crecimiento ascendería a 2.31% condicionada a los altos valores presentados en 2020, 2021 y 2022, lo cuales fueron de 1 475.97, 1 719.92 y 1 702.3807 kilovatios hora de consumo de energía renovable.

De acuerdo con datos de Ritchie et al. (2024), el aumento en los últimos 3 años de los niveles de energía renovable se deben principalmente al aumento de la energía solar en complemento con la energía eólica, las cuales tuvieron un incremento de 1.19 Teravatios hora (TWh) en 2017 a 19.27 Teravatios hora en 2022, es decir, en tan solo 6 años la energía solar aumentó 16.19 veces. En el caso de la energía eólica, en 2017 pasó de 10.62 TWh a 20.32 TWh en 2022, lo que significa 1.91 veces de incremento en los 6 años.

Hasta este punto, en relación con la energía renovable y la energía fósil, se ha enfatizado que se trata de consumo de energía “primaria” en los dos casos, pero, ¿qué es la energía primaria? Y ¿de qué otra forma se clasifica el consumo de energía? Para responder estas preguntas, revisemos un interesante artículo de la doctora en Geociencias por la Universidad de Edimburgo Hannah Ritchie. La respuesta es la que sigue.

Existen cuatro formas fundamentales de medir la energía: energía primaria, secundaria, final y útil. Estas métricas capturan las transformaciones y pérdidas que ocurren a lo largo de la cadena energética. Las diferencias entre la primera etapa (energía primaria) y la última (energía útil) pueden ser muy grandes. Por eso es importante tener claro a qué métrica se hace referencia cuando se habla de datos sobre energía.

Energía primaria. La energía primaria es la energía que está disponible en forma de recursos (por ejemplo, los combustibles que se queman en las centrales eléctricas) antes de ser transformada. Esto se relaciona con el carbón antes de que se queme, el uranio o los barriles de petróleo. Esta es la estadística más ampliamente disponible y la más utilizada.

Energía secundaria. Cuando se convierte la energía primaria en una forma transportable se habla de energía secundaria. Por ejemplo, cuando se quema carbón en una central eléctrica para producir electricidad, la electricidad es una forma de energía secundaria. La energía

secundaria incluye combustibles líquidos (como la gasolina y el diésel, que son petróleo refinado), electricidad y calor.

Energía final. Una vez que se ha transportado energía secundaria al consumidor, se tiene energía final. La energía final es lo que un consumidor compra y recibe, como la electricidad en su hogar, la calefacción o la gasolina en el surtidor de combustible.

Energía útil. Este es la última etapa en la cadena energética. Es la energía que se destina al resultado deseado de la aplicación de uso final. En el caso de una bombilla, es la cantidad de luz que se produce. En el caso de un coche, es la cantidad de energía cinética (movimiento) que se produce.

Cada etapa de la cadena energética genera pérdidas

En cada etapa de la cadena energética se pierde o desperdicia algo de energía. Las cuatro métricas reflejan las pérdidas de energía de las siguientes maneras. Energía primaria en secundaria: la conversión de energía primaria en secundaria puede ser muy ineficiente. En las centrales térmicas, que convierten combustibles fósiles, biomasa o energía nuclear en electricidad, hasta dos tercios de la energía primaria se desperdician en forma de calor. Por cada tres unidades de energía que introducimos, solo se obtiene una unidad de electricidad.

Como las pérdidas de energía primaria son particularmente grandes en el caso de los combustibles fósiles, su contribución a la demanda energética es mucho mayor en términos de energía primaria en comparación con las otras tres formas de medir la energía. Es importante saber esto porque puede distorsionar la percepción de la contribución de las fuentes bajas en carbono: en términos de energía primaria, pueden parecer menores porque se diluyen con la energía desperdiciada que acompaña a la quema de combustibles fósiles.

Energía secundaria a final: también se pierde energía en el proceso de entrega al consumidor. Esto se denomina pérdida de "transmisión y distribución". Cuando transporta electricidad desde una central eléctrica (energía secundaria) hasta los hogares (energía final), por ejemplo, se pierde una proporción al transmitirla a través de las líneas eléctricas.

Energía final útil: ningún aparato es completamente eficiente a la hora de proporcionar únicamente el rendimiento deseado. En el caso de una bombilla, la energía útil (la que se desea) es la luz, pero las bombillas también producen calor. La energía útil de los coches es el movimiento, pero los motores también producen calor y ruido. Por lo tanto, cualquier energía que no se utilice específicamente para el uso deseado de un aparato es un desperdicio. La energía que necesitan los usuarios finales es a menudo una pequeña fracción de la que entra en la parte superior del sistema.

El mundo produce mucha energía y la mayor parte se pierde en el camino. Las cuatro medidas diferentes capturan la energía que está disponible en las distintas etapas de esta cadena (Ritchie, 2023).

### **Capítulo III. ¿Hacia una reducción del CO<sub>2</sub>? Los argumentos teóricos de la Curva Ambiental de Kuznets y la Hipótesis del Paraíso de contaminación**

*En 1543 la teoría geocéntrica enfrentó su primer cuestionamiento serio con la publicación de De Revolutionibus Orbium Coelestium de Nicolás Copérnico, allí se aseguraba que la Tierra y los demás planetas, contrariamente a lo aceptado en ese momento, rotaban alrededor del Sol. Sin embargo, el sistema geocéntrico se mantuvo varias décadas, ya que el sistema copernicano no ofrecía mejores predicciones de los sucesos cósmicos que el anterior, y además suponía un problema para la filosofía natural, así como para la educación religiosa.*

El objetivo de este capítulo es presentar las explicaciones que sustentan el enfoque teórico de la Curva Ambiental de Kuznets y la hipótesis del Paraíso de contaminación, para ello, se realiza un análisis cronológico de los principales trabajos que aportado a la construcción teórica de estos enfoques.

#### **3.1 La curva ambiental de Kuznets**

La hipótesis de la Curva Ambiental de Kuznets (CAK o EKC, por sus siglas en inglés) tiene su origen en el año de 1991 con el trabajo “*Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement*” (al español traducido como, *Impactos Ambientales del Tratado de Libre Comercio de América del Norte*) de los investigadores de la Universidad de Princeton Gene M. Grossman y Alan B. Krueger.

En lo que parece ser una respuesta a la oposición de los grupos de protección al medioambiente por el tratado de libre comercio entre México y Estados Unidos que se encontraba en negociaciones en ese tiempo, los autores encontraron que la relación entre contaminación del aire y el crecimiento económico sigue una forma de U invertida. El desarrollo es el que sigue.



En la introducción de este documento de trabajo, los autores señalaron que, los grupos de defensa del medio ambiente de Estados Unidos expresaban su preocupación por el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) y que algunos llegaron incluso a oponerse a que el Congreso concediera al Presidente la autoridad para negociar por la vía rápida, con lo cual, los negociadores estadounidenses podrían entablar conversaciones con sus homólogos mexicanos.

Según Grossman y Krueger los ecologistas expresaban su temor hacía la liberalización del comercio y a los flujos de inversión directa entre Estados Unidos y México, ya que podrían agravar los problemas de contaminación en México y en la región fronteriza. En el nivel menos exigente, algunos argumentaron simplemente que cualquier expansión de los mercados y de la actividad económica conduce inevitablemente a una mayor contaminación y a un agotamiento más rápido de los escasos recursos naturales. Es decir, un sistema de comercio mundial abierto puede ser contrario al objetivo de preservar un bien común limpio, sano y sostenible (Grossman & Krueger, 1991).

En un argumento más agudo de los grupos, se reconocía que la contaminación ya era un problema grave en México y que la débil infraestructura reguladora del país estaba al límite de su capacidad, en esas condiciones, se temía que cualquier mayor industrialización derivada de la liberalización del comercio y la inversión agravará una situación ya de por sí grave.

Otra preocupación de algunos grupos ecologistas era que un TLCAN podía rebajar las normas reguladoras en Estados Unidos. Los portavoces sostuvieron el argumento político-económico de que, con un comercio más libre, los industriales estadounidenses exigirían controles menos estrictos de la contaminación para preservar su competitividad internacional, de modo que las normas medioambientales tenderían hacia un mínimo común denominador. A estos grupos les preocupaba, además, que las leyes de protección

ambiental vigentes en Estados Unidos pudieran considerarse barreras no arancelarias al comercio en el contexto del acuerdo comercial.

En respuesta Grossman & Krueger (1991), remarcaron que aunque los grupos ecologistas plantearon una serie de cuestiones válidas, habían sido incapaces de dar respuestas convincentes y bien fundamentadas. Muchos de sus argumentos no reconocían todas las implicaciones de la liberalización del comercio para la asignación de recursos y el uso de los recursos naturales en cada uno de los países socios comerciales.

Respondieron, además, que las afirmaciones empíricas hechas se basaban sobre todo en pruebas anecdóticas y en la extrapolación de la experiencia en una región o industria (la textil) al conjunto de la actividad económica en México. Lo anterior aunado, a que se sabía relativamente poco a cualquier nivel de generalidad sobre la relación entre el régimen comercial de un país y su índice de degradación medioambiental, o incluso sobre la relación entre el grado de desarrollo económico de un país y su producción de contaminación.

Es en este contexto que se plantearon los tres efectos conocidos de la CAK, concebidos en ese entonces como, los distintitos mecanismos por los que un cambio en la política comercial y de inversión extranjera puede afectar al nivel de contaminación y al ritmo de agotamiento de los escasos recursos medioambientales. Los mecanismos planteados son:

Efecto de escala. Si la liberalización del comercio y la inversión provoca una expansión de la actividad económica, y si la naturaleza de esa actividad no cambia, entonces la cantidad total de contaminación generada debe aumentar. Los grupos ecologistas señalaron las nocivas consecuencias medioambientales de la combustión de combustibles fósiles y la contaminación atmosférica generada por la industria del transporte por carretera.

Por otro lado, en la medida en que el crecimiento económico da lugar a una mayor demanda de energía, habrá un aumento de la producción de contaminantes nocivos que acompaña

al aumento de la producción económica. Del mismo modo, en la medida en que la expansión del comercio dé lugar a una mayor demanda de servicios de transporte transfronterizos sin que se produzca ningún cambio en las prácticas de transporte por carretera, el aumento del comercio contribuirá a un deterioro de la calidad del aire.

Efecto de composición. Cuando se liberaliza el comercio, los países se especializan en mayor medida en los sectores en los que disfrutaban de una ventaja competitiva. Si la ventaja competitiva se deriva en gran medida de las diferencias en la normativa ambiental, entonces el efecto de composición de la liberalización del comercio será perjudicial para el medio ambiente. Cada país tenderá entonces a especializarse más en las actividades que su gobierno no regula estrictamente, y abandonará la producción en las industrias en las que los costes locales de reducción de la contaminación son relativamente grandes.

Por otra parte, si las fuentes de la ventaja comparativa internacional son las más tradicionales, es decir, las diferencias entre países en cuanto a abundancia de factores y tecnología, las implicaciones del efecto composición para el medioambiente son ambiguas. La liberalización del comercio llevará a cada país a desplazar recursos hacia los sectores que hacen un uso intensivo de sus factores abundantes. El efecto neto de esto sobre el nivel de contaminación en cada lugar dependerá de si las actividades intensivas en contaminación se expanden o se contraen en el país que, en promedio, tenga los controles de contaminación más estrictos.

Efecto técnico. La producción no tiene por qué producirse exactamente con los mismos métodos tras la liberalización del comercio y la inversión extranjera que antes del cambio de régimen. En particular, la producción de contaminación por unidad de producto económico no tiene por qué ser la misma. Hay al menos dos razones para creer que la contaminación por unidad de producto puede disminuir, especialmente en un país menos desarrollado.

En primer lugar, los productores extranjeros pueden transferir tecnologías modernas a la economía local cuando se relajan las restricciones a la inversión extranjera. Las tecnologías más modernas suelen ser más limpias que las más antiguas debido a la creciente concienciación mundial sobre la urgencia de los problemas medioambientales.

En segundo lugar, y quizá más importante, si la liberalización del comercio genera un aumento de los niveles de ingreso, el cuerpo político puede exigir un medio ambiente más limpio como expresión de su mayor riqueza nacional. Así, unas normas de contaminación más estrictas y una aplicación más rigurosa de las leyes existentes pueden ser una respuesta política natural al crecimiento económico.

En las siguientes secciones, los autores van más allá de los postulados teóricos al estudiar empíricamente la relación entre la calidad del aire y el crecimiento económico para los contaminantes dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), materia oscura (humo) y partículas en suspensión en una muestra de datos panel con 42, 19 y 29 países respectivamente en los que se incluyó naciones desarrolladas y en vías de desarrollo alrededor del mundo durante los años 1977, 1982 y 1988. Como variables explicativas se incluyeron las funciones del PIB per cápita (lineal, cuadrática y cúbica), características del lugar y una tendencia temporal.

Sus resultados revelaron que las relaciones estimadas para la mediana de las observaciones diarias de SO<sub>2</sub> y materia oscura se mantuvieron y en todos los casos, los datos indicaron una relación en forma de U invertida entre contaminación e ingreso nacional, con niveles máximos de contaminación para rentas per cápita comprendidas entre 4 000 y 5 000 dólares. Sólo los coeficientes estimados a partir de un modelo de efectos fijos para las partículas en suspensión sugirieron una relación diferente, en este caso, la estimación indicó una relación creciente entre la contaminación por partículas y la producción nacional.

En las conclusiones se remarca que, mediante su examen, el crecimiento económico tiende a aliviar los problemas de contaminación una vez que la renta per cápita de un país alcanza entre los 4 000 y 5 000 dólares estadounidenses. En esa época, México con un PIB per cápita de 5 000 dólares, se encontraba en una coyuntura crítica de su proceso de desarrollo, en la que un mayor crecimiento debería generar mayores presiones políticas para la protección del medio ambiente y quizá un cambio en el comportamiento del consumo privado. En segundo lugar, la liberalización del comercio puede aumentar la especialización mexicana en sectores que causan menos daños medioambientales.

Finalmente, los autores advierten que sus conclusiones debían ser provisionales hasta la disposición de mejores datos ya que no habían utilizado ninguna información sobre la situación de contaminación en México, debido a que la vigilancia del medio ambiente era poco sistemática. Por ejemplo, no se contaba con datos fiables sobre emisiones de CO<sub>2</sub> en los distintos países. El trabajo concluye en torno a que las repercusiones medioambientales de la liberalización del comercio dependerán no sólo del efecto del cambio político en la escala global de la actividad económica, sino también de los cambios inducidos en la composición intersectorial y en las tecnologías que se utilizan para producir bienes y servicios (Grossman & Krueger, 1991).

Holtz-Eakin & Selden (1992) presentarían muy temprano un estudio contradictorio. A raíz de las crecientes preocupaciones por el posible calentamiento global de la época, las investigaciones habían centrado la atención en la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera, abriendo un activo debate sobre la conveniencia de reducir las emisiones. En el centro de ese debate se encontraba la futura trayectoria tanto de las emisiones de gases de efecto invernadero como del desarrollo económico de las naciones.

En este contexto, su estudio utilizó datos panel a nivel mundial para estimar la relación entre la renta per cápita y las emisiones de dióxido de carbono, y luego calcular las trayectorias

para prever las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub>. Su análisis arrojó cuatro resultados principales:

(i) La evidencia encontró una propensión marginal a emitir (PME) CO<sub>2</sub> decreciente a medida que las economías se desarrollan.

(ii) A pesar de la disminución de la PME, las previsiones mostraron que las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> seguirían creciendo a un ritmo anual del 1.8%.

(iii) El crecimiento continuado se debía al hecho de que el crecimiento económico y demográfico será más rápido en los países de renta baja que tienen la mayor PME.

(iv) El análisis de sensibilidad sugirió que el ritmo de desarrollo económico no alteraba drásticamente el flujo futuro anual o acumulado de emisiones de CO<sub>2</sub>.

En 1993, Panayotou profundizó en la analogía en forma de U invertida y fue este autor quien acuñó el término “Curva Ambiental de Kuznets” debido a la semejanza con la forma introducida por Simon Kuznets (1955) décadas atrás en su estudio sobre el crecimiento económico y desigualdad. El objetivo de Panayotou (1993) fue probar empíricamente la hipótesis de que existe una relación en forma de U invertida entre degradación ambiental y desarrollo económico, y deducir sus implicaciones políticas para el empleo, la transferencia de tecnología y la ayuda al desarrollo.

A falta de series de tiempo sobre la degradación ambiental de cada país, probó la hipótesis de la CAK utilizando datos transversales de una muestra de países desarrollados y en desarrollo. Al no disponer de un único índice de degradación medioambiental, seleccionó la deforestación como variable representativa del agotamiento de los recursos naturales y el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), los óxidos nitrogenados (NO<sub>x</sub>) y las partículas sólidas como contaminantes industriales y relacionados con la energía.

Su análisis, tanto teórico como empírico, también sugirió una relación en forma de U invertida entre al menos estas dos formas de degradación medioambiental y el desarrollo económico. Los estudios realizados simultánea e independientemente hallaron resultados similares, lo que apoyó a la hipótesis de la CAK. Los resultados indicaron que el punto de inflexión de la deforestación se produce mucho antes que el punto de inflexión de las emisiones. La degradación del medio ambiente en general (agotamiento de recursos y contaminación combinados) es peor a niveles de renta per cápita inferiores.

Panayotou (1993) señaló además, que la degradación medioambiental tiende a empeorar antes de mejorar a lo largo del desarrollo de un país, siendo inevitable cierto deterioro como parte de los cambios estructurales que acompañan al crecimiento económico, la CAK no tendría por qué ser tan pronunciada como en el caso en muchos países en desarrollo. Agrega que parte de la inclinación de la relación en forma de U invertida se debe a distorsiones políticas como las subvenciones a la energía y los productos agroquímicos, la protección de la industria y la infravaloración de los recursos naturales, que son destructivas tanto económica como medioambientalmente.

En este sentido, los gobiernos de los países en desarrollo pueden contribuir a aplanar su CAK mediante, la eliminación de las distorsiones políticas, internalizando los costes medioambientales en las actividades que los generan y definiendo y aplicando los derechos de propiedad sobre los recursos naturales.

Así mismo, los organismos de ayuda al desarrollo pueden contribuir aún más a aplanar la CAK de un país en desarrollo haciendo de la protección del medio ambiente parte integrante de la financiación de sus proyectos y políticas. Por último, los países desarrollados pueden ayudar a los países en desarrollo, a través de mecanismos de financiación, a conservar los recursos naturales, incluida la biodiversidad, que generan beneficios globales que podrían

perderse irreversiblemente durante las primeras fases del desarrollo económico (Panayotou, 1993).

En 1994, Selden & Song, utilizando un panel transnacional de datos sobre emisiones de cuatro contaminantes atmosféricos: partículas en suspensión, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono, observaron que las emisiones per cápita de estos cuatro contaminantes presentaban relaciones de U invertida con el PIB per cápita. Aunque esto sugería que las emisiones disminuirían a muy largo plazo, pronosticaron un rápido crecimiento continuado de las emisiones mundiales en las décadas futuras.

Además, los autores agregaron cuatro factores que pueden provocar un descenso final en la curva, al menos para algunos contaminantes, estos son: (i) elasticidades de renta positivas para la calidad ambiental; (ii) cambios en la composición de la producción y el consumo; (iii) aumento de los niveles de educación y concienciación ambiental; y (iv) sistemas políticos más abiertos (Selden & Song, 1994).

En ese mismo año, para probar el impacto del comercio (variable que se había mencionado, pero no medido hasta ese momento en el contexto de la CAK) Copeland & Taylor (1994) presentaron un modelo en el que examinaron cómo el comercio entre dos países diferenciados únicamente por la renta puede afectar a la calidad del medio ambiente. Sus resultados más importantes fueron que las ganancias de renta derivadas del comercio pueden afectar a la contaminación de forma diferente a las ganancias obtenidas del crecimiento económico y, además, que el crecimiento económico tiene efectos diferentes sobre la contaminación en un régimen de libre comercio que en autarquía.

Según los autores, el comercio internacional abre un canal diferente que, puede provocar un aumento de la contaminación mundial. Aunque el comercio, al igual que el crecimiento, aumenta la renta real en ambos países, también crea un efecto composición que es



fundamental para determinar el efecto del comercio en la contaminación. Si las diferencias en los impuestos sobre la contaminación son el único motivo para el comercio, y el comercio no iguala los precios de los factores, entonces el paso de la autarquía al libre comercio aumenta la contaminación mundial agregada.

Cropper & Griffiths (1994) estimaron la relación propuesta por la CAK utilizando como variable dependiente la deforestación y como independientes la población y el crecimiento económico a través de datos de corte transversal y series temporales para Latinoamérica y África durante el periodo 1961-1988, incluyeron datos de los países para captar los factores que cambian lentamente con el tiempo, como la proximidad de los bosques a las ciudades o los ríos. Para captar los efectos de las presiones demográficas, incluyeron también en la ecuación la densidad de población rural y la tasa de crecimiento demográfico.

Sus conclusiones, sostuvieron que a veces se interpreta que el crecimiento de la renta, si es lo suficientemente rápido, resolverá los problemas medioambientales. Pero ese no fue el caso para la deforestación en América Latina o África. Para un país de América Latina, la tasa de deforestación en el pico de la curva fue del 1.63% anual. Incluso con una renta per cápita de 8 000 dólares, la tasa de deforestación fue del 1.26%, lo que no indica que el crecimiento económico vaya a resolver los problemas de deforestación.

En África, la situación fue aún más sombría. La densidad de población rural desplazó al alza la relación entre ingresos y deforestación, de modo que un país con una densidad de población rural igual a la de Kenia (0.3 personas por hectárea) tuvo una tasa máxima de deforestación del 1.91% anual, mientras que un país con la densidad de población rural de Malawi (0.7 personas por hectárea) tuvo una tasa máxima de deforestación del 3.21% anual

A pesar de estas sombrías predicciones, sería inapropiado concluir que reducir la tasa de crecimiento de la población es necesariamente el mejor método para reducir la tasa de

deforestación. Dado que los derechos de propiedad no suelen estar definidos o no se aplican, el coste privado de la deforestación es nulo. Dicho de otro modo, como las personas no tienen derecho de propiedad sobre la tierra, no tienen incentivos para tomar decisiones eficientes en cuanto al uso de la tierra (Cropper & Griffiths, 1994).

En 1995, Grossman & Krueger nuevamente examinaron la relación de forma reducida entre el ingreso per cápita y cuatro tipos de indicadores: la contaminación del aire urbano, el estado del régimen de oxígeno en las cuencas fluviales, la contaminación fecal de las cuencas fluviales y la contaminación de las cuencas fluviales por metales pesados.

No encontraron evidencia de que la calidad ambiental se deteriore constantemente con el crecimiento económico. Más bien, para la mayoría de los indicadores, el crecimiento económico conlleva una fase inicial de deterioro seguida de una fase posterior de mejora. Los puntos de inflexión para los distintos contaminantes varían, pero en la mayoría de los casos se producen antes de que un país alcance un ingreso per cápita de 8 000 dólares.

Defendieron que, que si bien, sus medidas cubrían relativamente pocas dimensiones de la calidad medioambiental, su estudio era el más completo posible dada la escasa disponibilidad de datos comparables de distintos países. Respondieron contrariamente a los “gritos alarmistas” de algunos grupos ecologistas, puesto que no encontraron pruebas en este nuevo estudio de que el crecimiento económico cause un daño inevitable al hábitat natural (Grossman & Krueger, 1995).

Por el contrario, observaron que, si bien el aumento del PIB puede ir asociado a un empeoramiento de las condiciones medioambientales en los países muy pobres, la calidad del aire y del agua parece beneficiarse del crecimiento económico una vez alcanzado cierto nivel crítico de renta. Los puntos de inflexión en sus relaciones de U invertida variaron para

los distintos contaminantes, pero en casi todos los casos se producían con una renta inferior a 8 000 dólares (dólares de 1985).

Su estudio hace las siguientes contribuciones.

(i) La calidad medioambiental podría mejorar automáticamente cuando los países se desarrollan si sustituyen las tecnologías más sucias por otras más limpias, o si se produce un efecto muy pronunciado sobre la contaminación de las pautas típicas de la transformación estructural.

(ii) Es posible que las pautas descendentes y en forma de U invertida se deban a que, a medida que los países se desarrollan, dejan de producir determinados bienes que contaminan mucho y, en su lugar, empiezan a importar estos productos de otros países con leyes de protección del medio ambiente menos restrictivas.

Sin embargo, los datos disponibles no respaldaron la hipótesis de que las diferencias entre países en cuanto a normas medioambientales sean un determinante importante del patrón global del comercio. Aunque es indudable que se produce cierto “*dumping* medioambiental”, el volumen de este comercio es probablemente demasiado pequeño para explicar la reducción de la contaminación que se ha observado que acompaña a los episodios de crecimiento económico.

Por último, subrayaron que no había nada inevitable en las relaciones pasadas, los patrones reflejaban las condiciones tecnológicas, políticas y económicas que existían, por lo que, los países de renta baja tenían una oportunidad única de aprender de esa historia y evitar así algunos de los errores de anteriores experiencias de crecimiento. Con el aumento de la concienciación sobre los peligros medioambientales y el desarrollo de nuevas tecnologías más limpias que nunca, esperaban que los países de renta baja prestaran atención a la

preservación del medio ambiente en etapas de desarrollo más tempranas que las anteriores (Grossman & Krueger, 1995).

En el mismo año Arrow et al. (1995), refutaría la hipótesis de la CAK, señalando que hasta ese momento la curva en forma de U invertida sólo se aplicaba a un conjunto seleccionado de contaminantes y que los economistas habían conjeturado que la curva se aplicaba a la calidad ambiental en general.

Enfatizaban que, aunque los primeros resultados sugerían que el crecimiento económico podía estar asociado a mejoras en algunos indicadores medioambientales, no implican ni que el crecimiento económico fuera suficiente para inducir mejoras medioambientales en general, ni que puedan ignorarse los efectos medioambientales del crecimiento, ni que la base de recursos de la Tierra fuera capaz de soportar un crecimiento económico indefinido. Ya que, si esta base se degradara irreversiblemente, la propia actividad económica podría estar en peligro (Arrow et al., 1995).

Su discusión se desarrolló alrededor de tres temas: crecimiento económico, instituciones y medio ambiente, capacidad de carga y resistencia de los ecosistemas y crecimiento económico y política medioambiental.

Crecimiento económico, instituciones y medio ambiente

Se había demostrado que la relación es válida para los contaminantes que implican costes locales a corto plazo (p.ej. azufre, partículas y coliformes fecales), pero no para la acumulación de existencias de residuos o para los contaminantes que implican costes a largo plazo y más dispersos, como el CO<sub>2</sub>, que suelen ser funciones crecientes de la renta. Segunda, las relaciones de U invertida se descubrieron para las emisiones de contaminantes, no para las reservas de recursos. Es menos probable que la relación se

mantenga donde los efectos de retroalimentación de las reservas de recursos sean significativos, como en el caso del suelo y su cubierta, los bosques y otros ecosistemas.

Tercera, las curvas U invertida, tal y como se han estimado, no dicen nada sobre las consecuencias de las reducciones de emisiones en el conjunto del sistema. Por ejemplo, las reducciones de un contaminante en un país pueden implicar aumentos de otros contaminantes en el mismo país o transferencias de contaminantes a otros países. Y cuarta, en la mayoría de los casos en que las emisiones han disminuido con el aumento de la renta, las reducciones se han debido a reformas institucionales locales, como la legislación medioambiental y los incentivos basados en el mercado para reducir el impacto ambiental. Pero esas reformas suelen ignorar las consecuencias internacionales e intergeneracionales (Arrow et al., 1995).

#### Capacidad de carga y resistencia de los ecosistemas

La base de recursos medioambientales de la que depende en última instancia toda actividad económica incluye sistemas ecológicos que producen una amplia variedad de servicios. Esta base de recursos es finita. Además, un uso imprudente de la base de recursos medioambientales puede reducir irreversiblemente la capacidad de generar producción material en el futuro. Todo ello implica que existen límites a la capacidad de carga del planeta. Por supuesto, es posible que las mejoras en la gestión de los sistemas de recursos, acompañadas de cambios estructurales en la economía que conserven los recursos, permitan el crecimiento económico y demográfico a pesar de la finitud de la base de recursos medioambientales, al menos durante algún tiempo (Arrow et al., 1995).

Sin embargo, para que eso sea siquiera concebible, es necesario que en el sistema económico se generen señales que reflejen efectivamente la creciente escasez de la base de recursos. Las capacidades de carga en la naturaleza no son relaciones fijas, estáticas o

simples. Dependen de la tecnología, las preferencias y la estructura de producción y consumo. También dependen del estado siempre cambiante de las interacciones entre el entorno físico y biótico. Una cifra única para la capacidad de carga humana carecería de sentido porque las consecuencias tanto de la innovación humana como de la evolución biológica son inherentemente incognoscibles. No obstante, sigue siendo útil un índice general de la escala o intensidad actual de la economía humana en relación con la de la biosfera.

Para que las actividades humanas sean sostenibles, se debe garantizar la resistencia de los sistemas ecológicos de los que dependen las economías. El problema que plantea la elaboración de políticas medioambientales es garantizar que se mantenga la capacidad de recuperación, aunque los límites de la naturaleza y la escala de las actividades económicas así requeridas sean necesariamente inciertos (Arrow et al., 1995).

#### Crecimiento económico y política medioambiental

Los investigadores llegan a la conclusión de que la liberalización económica y otras políticas que fomentan el crecimiento del PIB no sustituyen a la política medioambiental. Al contrario, puede ser deseable que vayan acompañadas de reformas políticas más estrictas. Tienen en cuenta que los daños medioambientales, incluida la pérdida de resistencia ecológica, suelen producirse de forma abrupta y con frecuencia no son reversibles. Estos a su vez, raramente pueden preverse a partir de los sistemas de señales que suelen recibir los responsables de la toma de decisiones en el mundo actual.

Además, las señales que sí existen a menudo no se observan, o se interpretan erróneamente, o no forman parte de la estructura de incentivos de las sociedades. Esto se debe al desconocimiento de los efectos dinámicos de los cambios en las variables de los ecosistemas (por ejemplo, umbrales, capacidad de amortiguación y pérdida de resiliencia)

y a la presencia de impedimentos institucionales, como la falta de derechos de propiedad bien definidos (Arrow et al., 1995).

Finalmente dirán que el crecimiento económico no es una panacea para la calidad del medio ambiente, de hecho, ni siquiera es la cuestión principal. Lo que importa es el contenido del crecimiento: la composición de los insumos (incluidos los recursos medioambientales) y los productos (incluidos los residuos). Este contenido viene determinado, entre otras cosas, por las instituciones económicas en las que se desarrollan las actividades humanas.

Estas instituciones deben diseñarse de modo que ofrezcan los incentivos adecuados para proteger la resistencia de los sistemas ecológicos. Tales medidas no sólo fomentarán una mayor eficiencia en la asignación de los recursos medioambientales en todos los niveles de renta, sino que también garantizarán una escala sostenible de actividad económica dentro del sistema ecológico que sustenta la vida. Proteger la capacidad de los sistemas ecológicos para mantener el bienestar es tan importante para los países pobres como para los ricos (Arrow et al., 1995).

Al siguiente año, D. I. Stern et al. (1996) realizaría una crítica al concepto de la CAK, apuntando que el concepto depende de un modelo de economía en el que no hay retroalimentación de la calidad del medio ambiente a las posibilidades de producción, y en el que el comercio tiene un efecto neutro sobre la degradación medioambiental. La violación real de estos supuestos da lugar a problemas fundamentales a la hora de estimar los parámetros de una CAK. Además, la deducción de algunas de estas estimaciones sobre la CAK de que un mayor desarrollo reducirá la degradación medioambiental depende del supuesto de que la renta per cápita mundial se distribuye normalmente, cuando en realidad la mediana de la renta está muy por debajo de su promedio.

Concluyeron que los problemas asociados tanto al concepto como a la aplicación empírica de la CAK son tales que su utilidad se limita al papel de estadística descriptiva. Proponen que un enfoque más fructífero del análisis de la relación entre crecimiento económico e impacto ambiental sería el examen de la experiencia histórica de los distintos países, utilizando análisis econométricos y también históricos cualitativos. También, serían necesarios importantes ajustes políticos para que la economía mundial avance hacia una senda de desarrollo sostenible. Su postura, sostuvo que el enfoque CAK no tiene mucho que ofrecer a la hora de informar sobre las opciones que se plantean a los responsables políticos.

En 1997 Cole et al., estudiaron la relación entre la renta per cápita y una amplia gama de indicadores medioambientales utilizando conjuntos de paneles de países. Mencionaron que la forma en que se llevó a cabo su estudio, superaban varios de los puntos débiles asociados a la estimación de las curvas de Kuznets medioambientales, señalados por D. I. Stern et al. (1996).

Sus resultados sugirieron que sólo existían CAK significativas para los contaminantes atmosféricos locales, mientras que los indicadores con un impacto más global, o indirecto, o bien aumentaban monótonicamente con la renta, o bien presentaban puntos de inflexión predichos en niveles altos de renta per cápita con grandes errores estándar, a menos que hubieran sido objeto de una iniciativa política multilateral. También ofrecieron otras dos conclusiones:

- (i) Que la concentración de contaminantes locales en las zonas urbanas alcanza su punto máximo a un nivel de renta per cápita inferior al de las emisiones totales per cápita;
- (ii) Que los contaminantes atmosféricos locales generados por el transporte alcanzan su punto máximo a un nivel de renta per cápita superior al de las emisiones totales per cápita.



Sus resultados sugirieron que sólo existen CAK's significativas para los contaminantes atmosféricos locales, mientras que los indicadores con un impacto medioambiental global o indirecto aumentan monotónicamente con la renta o presentan puntos de inflexión elevados con grandes errores estándar. Estos puntos de inflexión son poco fiables. Los resultados de este trabajo también apoyan la hipótesis de Selden & Song (1994) de que las concentraciones atmosféricas urbanas alcanzarán su punto máximo a niveles de renta más bajos que las emisiones per cápita. Esto implica que es más fácil mejorar la calidad del aire urbano que reducir las emisiones nacionales.

Sin embargo, la diferencia entre los niveles de renta de los dos puntos de inflexión no parece ser tan grande como Selden & Song (1994) sugirieron en un principio. Es importante que las CAK estimadas para los contaminantes atmosféricos locales no se interpreten erróneamente, en términos de su impacto global. Como señalan D. I. Stern et al. (1996) y Selden & Song (1994), la distribución mundial de la renta es asimétrica, con una renta mediana per cápita mundial muy inferior al promedio, por lo que las emisiones totales de un contaminante pueden seguir aumentando a medio plazo, aunque se estime que las emisiones per cápita alcanzan su punto máximo a un nivel de renta per cápita razonablemente bajo.

Cole et al. (1997) pusieron de relieve la necesidad de abordar los indicadores indirectos, en particular el uso de energía y los volúmenes de tráfico ya que el aumento constante de esos indicadores estaba obstaculizando claramente los intentos de controlar las emisiones de dióxido de carbono y las emisiones de contaminantes atmosféricos locales generadas por el transporte.

Por último, coincidieron con Grossman & Krueger (1995) al secundar que no hay nada inevitable en la relación entre la renta per cápita y la calidad medioambiental, tal y como se encapsula en la CAK ajustada a los datos históricos, debido a que su análisis ilustró que

unas políticas adecuadas pueden “atravesar” las CAK’s. Aunque hubo pruebas de que los países desarrollados habían “superado” algunos problemas de contaminación, subrayaron que no se trata en absoluto de un proceso automático. Pues, los niveles de contaminación sólo disminuyeron en respuesta a las iniciativas políticas y de inversión.

Posteriormente Ekins (1997), examinó la investigación en su conjunto y concluyó que las pruebas inequívocas de una relación CAK eran muy escasas, que había indicadores importantes que muestran una relación monotónicamente creciente y que incluso cuando podía haber una relación CAK, la mayor parte de la población mundial seguía estando en la sección de la curva que va en aumento, de modo que el crecimiento de la renta sobre la base de esta relación daría lugar a un daño ambiental adicional considerable; y que los exámenes de la calidad ambiental global incluso en los países más ricos mostraban que seguía disminuyendo.

Su principal conclusión sobre la relación entre medio ambiente y crecimiento, fue que la hipótesis de que existe una CAK no se sostiene de forma inequívoca para ningún indicador medioambiental. Los indicadores medioambientales para los que la hipótesis de la CAK era más plausible, o al menos poco más convincente, eran varios indicadores de contaminación atmosférica: NO<sub>x</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, partículas en suspensión y materia oscura.

Su análisis, también sugirió que cualquier mejora de la calidad medioambiental a medida que aumentan los ingresos probablemente sea resultado de la promulgación de políticas medioambientales y no de cambios endógenos en la estructura económica o la tecnología. Por último, al situar los puntos de inflexión de los distintos estudios en el contexto de la distribución de la población mundial, demostró que la continuación de la relación que daba lugar a los PI provocaría un daño medioambiental aún mayor durante varias décadas en el futuro.

Esos daños son claramente incompatibles con los compromisos para lograr un desarrollo sostenible. De hecho, en la medida en que los estudios de la CAK permitían extraer alguna conclusión, aportaban pruebas de un desarrollo insostenible y no de lo contrario. El desarrollo sostenible requiere la modificación de la relación histórica entre medio ambiente y renta. Tanto cuando existen pruebas limitadas de una relación en U invertida entre renta y calidad medioambiental como cuando existe una clara relación positiva entre estas variables. No hay pruebas de que tal modificación surja endógenamente del proceso de crecimiento. Parece probable que requiera una política medioambiental determinada (Ekins, 1997).

Por otro lado, Moomaw & Unruh (1997) afirmaron que los modelos de forma reducida no permiten comprender los procesos subyacentes que generan sus cambios. Compararon los modelos CAK con modelos de transición estructural de las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita y el PIB per cápita, y descubrieron que en el caso de 16 países estudiados y que experimentaron una transición de este tipo, el inicio de la misma no está correlacionado con los niveles de renta, sino con acontecimientos históricos relacionados con las crisis de los precios del petróleo de los años setenta y las políticas que las siguieron.

A continuación, se presentan las principales conclusiones de su estudio:

(i) Tras la transición, los países muestran un crecimiento continuado de la renta sin un crecimiento contemporáneo de las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita. Por lo tanto, las conclusiones anteriores de que las emisiones de CO<sub>2</sub> no disminuirán con rentas más altas o que los puntos de inflexión sólo se producen con ingresos muy altos (35 428 dólares), son incorrectas.

(ii) La transición hacia la disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> no parece correlacionarse con niveles de renta específicos, sino con un momento concreto en el tiempo, aparentemente en respuesta a una perturbación exógena histórica de estas economías.

(iii) Se observa que los países atraviesan la transición del carbono de forma simultánea y rápida, lo que indica una adaptabilidad a corto plazo no reconocida anteriormente.

(iv) Gran parte del efecto de “relación en forma de U invertida” y la presencia del polinomio de tercer orden pueden atribuirse al ajuste de la curva polinómica más que a relaciones estructurales subyacentes. Los resultados de la modelización de la transición estructural no confirman que la renta sea el factor decisivo en el abandono de las elasticidades positivas de las emisiones.

(v) El uso de modelos CAK para predecir el comportamiento futuro de las emisiones puede no ser apropiado, ya que no dan cuenta muy bien de los cambios discontinuos identificados en este estudio. El modelo de transición estructural ofrece una mejor descripción al tener en cuenta las perturbaciones históricas y las consiguientes respuestas del mercado y la normativa, pero es igualmente incapaz de predecir los cambios futuros.

La conciliación del crecimiento económico y el medio ambiente está en el centro de la búsqueda del desarrollo sostenible. Los modelos CAK han indicado que la relación entre las medidas de crecimiento económico y la degradación medioambiental no tiene por qué empeorar inevitablemente.

Sin embargo, los modelos CAK no han permitido comprender los procesos subyacentes a la función de forma reducida que generan. En cambio, los modelos de transición estructural presentados indican la existencia de cambios rápidos en respuesta a acontecimientos históricos que han dado lugar a una mejora de la relación emisiones-PIB. Aunque tampoco

han identificado los procesos subyacentes, al menos los han vinculado a acontecimientos históricos y a un periodo de tiempo determinado (Moomaw & Unruh, 1997).

Para 1998, Stokey desarrolló un modelo teórico de contaminación que generó una relación en forma de U invertida entre la renta per cápita y la calidad medioambiental. Este modelo se utilizó para estudiar el crecimiento a largo plazo, demostrando que la misma forma de U invertida aparecía en las series temporales y que las perspectivas de crecimiento sostenido dependen de si una normativa medioambiental cada vez más estricta es compatible con una tasa constante de rendimiento del capital. También, demostró que los regímenes fiscales y de vales resultan más ventajosos que la regulación directa, ya que proporcionan los incentivos adecuados para la acumulación de capital.

En un entorno dinámico, los sistemas de impuestos y vales tienen una ventaja adicional: en estos sistemas, el tipo de interés de mercado produce los incentivos correctos para la acumulación de capital. Con un impuesto sobre la contaminación o un sistema de vales, las emisiones tienen un precio de mercado totalmente independiente del rendimiento del capital. Por lo tanto, el rendimiento del capital en el mercado es una medida exacta del valor incremental de la inversión y proporciona el incentivo correcto para ahorrar. Así pues, es crucial no sólo que se imponga el impuesto, sino que se prevea con antelación, para que las decisiones de ahorro se orienten en consecuencia (Stokey, 1998).

Stokey (1998) adicionalmente planteó que muchos tipos de contaminación del aire y del agua traspasan las fronteras nacionales o regionales. Esto abordó la cuestión de cómo puede regularse eficazmente la contaminación en presencia de tales desbordamientos y de que si las conclusiones anteriores seguían siendo válidas en ese contexto.

Otra cuestión importante de su análisis fue la densidad de población, señaló que el crecimiento de la población está claramente relacionado con la renta per cápita, aunque de

formas que aún no se comprendían bien. Además, el desarrollo económico suele conllevar un gran desplazamiento de la población de las zonas rurales a las urbanas, donde la contaminación está más concentrada. Así pues, la renta tiene efectos indirectos, además de los directos (Stokey, 1998).

En el mismo año, Antweiler et al. (1998) investigó cómo afectaba la apertura a los mercados internacionales de bienes a las concentraciones de contaminación, para ello, desarrolló un modelo teórico para dividir el impacto del comercio en la contaminación en efectos de escala, técnicos y de composición y examinó esta teoría utilizando datos sobre concentraciones de dióxido de azufre.

Comprobaron que el comercio internacional generaba cambios relativamente pequeños en las concentraciones de contaminación cuando se altera la composición de la producción nacional. Su documento expuso una teoría sobre cómo la apertura a las oportunidades comerciales afectaba a las concentraciones de contaminación.

En general, los resultados indicaron que el aumento de la exposición de un país a los mercados internacionales genera cambios pequeños pero mensurables en las concentraciones de contaminación al alterar la intensidad contaminante de la producción nacional. Aunque sus estimaciones indicaron que una mayor intensidad comercial sólo crea cambios relativamente pequeños en la contaminación a través del efecto composición, la teoría económica y sus estudios empíricos revisados mostraron que el comercio también aumenta el valor de la producción y la renta nacional.

Estos aumentos de la producción y la renta repercutirán en las concentraciones de contaminación a través de sus efectos estimados de escala y técnica. Sus estimaciones de las elasticidades de escala y técnica mostraron que si la apertura a los mercados internacionales aumenta tanto la producción como la renta en un 1%, las concentraciones

de contaminación disminuyen aproximadamente un 1%. Llegan a una conclusión un tanto sorprendente (dijeron): “un comercio más libre es bueno para el medio ambiente” (Antweiler et al., 1998, p. 41).

En 1999, Agravas & Chapman, señalaron que una variable que se omite sistemáticamente en las relaciones CAK es el precio de la energía, su artículo analizó modelos anteriores para ilustrar la importancia de los precios en ellos, a continuación, incluyeron los precios en un marco econométrico CAK probando las relaciones energía-renta y CO<sub>2</sub>-renta. Los modelos precio-renta a largo plazo concluyeron que la renta ya no es el indicador más relevante de la calidad medioambiental o de la demanda de energía.

Afirmaron que los trabajos anteriores no habían incluido explícitamente el precio de la energía como variable independiente. La inclusión de esta variable tiene fuertes implicaciones para el análisis CAK. Esto pudo deberse a que el uso de la energía en todos los niveles de renta es elástico a los precios, especialmente a largo plazo, lo que provoca un aumento del uso de la energía, en presencia de una disminución de los precios reales de la energía, incluso en niveles bajos pero crecientes del PIB (Agravas & Chapman, 1999).

Es relevante mencionar que su modelo de precios a largo plazo hace que otros factores que antes eran importantes pasen a ser insignificantes. Las variables comerciales son ahora insignificantes, mientras que en otros trabajos se había demostrado que tienen un valor explicativo considerable. El problema según los autores podía ser un modelo “sobreadaptado” donde las variables dependientes se mueven muy lentamente, y muchas de las variables independientes están muy correlacionadas.

Señalan también que para países individuales, las opciones de crecimiento económico con un menor aumento del uso de energía se presentarían a través de: (i) el rápido crecimiento de las industrias de servicios; (ii) la importación de bienes más contaminantes; (iii) la

instalación de dispositivos nacionales de control de la contaminación; y (iv) el aumento de la eficiencia energética.

Según Agras & Chapman (1999), las prescripciones políticas en la literatura de la CAK discuten formas de desplazar el punto de inflexión hacia la izquierda (niveles más bajos de PIB), pero no mencionaron la reducción de los niveles globales de contaminación, que podía ser una cuestión más importante.

Un aumento de los precios de la energía es uno de los pocos elementos que reducirá los niveles globales de contaminación basada en la energía. Concluyeron que una política basada en la hipótesis de “esperar y crecer” no es adecuada. Los gobiernos deben emprender políticas para reducir los niveles de contaminación y las emisiones de CO<sub>2</sub>. Las futuras políticas en materia de cambio climático y energía deberían reconocer explícitamente la necesidad de políticas específicas centradas en los incentivos económicos y la innovación tecnológica.

Para la década de los 2000, Dasgupta et al. (2002) sostuvieron que los críticos “pesimistas” de curvas estimadas habían argumentado que las regiones decrecientes eran ilusorias, bien porque son instantáneas que enmascaran una “carrera hacia abajo” a largo plazo en las normas medioambientales o bien porque las sociedades industriales producirán continuamente nuevos contaminantes a medida que se controlen los antiguos, sin embargo, los autores fomentaban una visión optimista al sugerir que la curva en realidad se estaba aplanando y desplazando hacia la izquierda.

Según los autores, los factores que contribuyen al aplanamiento de la CAK son:

- (i) la función principal de la normativa medioambiental,
- (ii) la liberalización económica,



- (iii) regulación informal generalizada,
- (iv) presión de los agentes del mercado,
- (v) mejores métodos de regulación medioambiental, y;
- (vi) mejor información.

En el año 2004, Dinda señaló que en realidad, una CAK revela cómo cambia una medida técnicamente especificada de la calidad medioambiental a medida que cambia la riqueza de un país. Su artículo repasó algunos desarrollos teóricos y estudios empíricos que tratan este fenómeno. Las posibles explicaciones de la CAK se encuentran en (i) el progreso del desarrollo económico, desde la economía agraria limpia a la economía industrial contaminante y finalmente a la economía de servicios limpia; (ii) la tendencia de las personas con mayores ingresos a tener una mayor preferencia por la calidad medioambiental.

Su artículo examina una serie de estudios sobre la hipótesis de la curva de Kuznets medioambiental señalando que no hay acuerdo en la literatura sobre el nivel de renta (punto de inflexión) a partir del cual la degradación medioambiental empieza a mejorar. Observa que la degradación del medio ambiente es, en realidad, un problema polifacético y las distintas fases del daño medioambiental tienen algunas relaciones definidas con el crecimiento económico. Una de esas relaciones es la CAK, que puede explicarse de forma multidimensional o en términos de cuestiones multidimensionales.

Dinda (2004, p. 450) extrae las siguientes conclusiones:

- (i) Se necesitan modelos económicos que reflejen adecuadamente la base física y ecológica de la actividad económica y la importante retroalimentación entre la economía y el medio ambiente.

(ii) La identificación de los factores dominantes que explican la CAK debería tener una alta prioridad en la investigación. Sólo se puede diseñar una política que afecte al curso de la CAK cuando se han identificado adecuadamente los factores que la explican.

(iii) la estimación de modelos estructurales, en lugar de modelos de forma reducida, puede ser necesaria para identificar el mecanismo real con este fin.

(iv) el análisis de descomposición puede proporcionar más información sobre qué combinación de explicaciones es dominante, como el progreso tecnológico y los cambios estructurales.

(v) Además del análisis de datos de panel, deberían dedicarse esfuerzos al análisis de series temporales que pueden ofrecer una mejor imagen de la evolución de la contaminación asociada a fases específicas de desarrollo en países concretos.

(vi) A nivel político (no existe un proceso automático) son necesarias medidas políticas valientes que permitan la sostenibilidad económica.

(vii) En caso de adopción de nuevas tecnologías, la sociedad debe ser prudente ante los posibles contaminantes desconocidos y los peligros de los residuos.

A la par de Dinda (2004), D. I. Stern (2004) presentó una historia crítica de la curva medioambiental de Kuznets. Sus datos analizados demostraron que los países en desarrollo se estaban ocupando de los problemas medioambientales, a veces adoptando las normas de los países desarrollados con poco retraso y a veces obteniendo mejores resultados que algunos países ricos, y que los resultados de la CAK tienen un fundamento estadístico muy endeble.

Según D. I. Stern (2004), una nueva generación de modelos podía ayudar a desentrañar las verdaderas relaciones entre el desarrollo y el medio ambiente y podía llevar a la

desaparición de la clásica CAK. Sus datos demostraron que el análisis estadístico en el que se basa la curva de Kuznets medioambiental no es sólido, ya que había pocas pruebas de que exista una trayectoria común en forma de U invertida que sigan los países a medida que aumenta su renta. De ser posible la relación en forma de U invertida entre las concentraciones ambientales urbanas de algunos contaminantes y la renta, esto debería comprobarse con métodos más rigurosos de series temporales o datos de panel.

Coincide que la verdadera forma de la relación entre emisiones e ingresos pudiera ser una mezcla de dos de los escenarios propuestos por Dasgupta et al. (2002). La forma general de una CAK de "nuevos tóxicos" con un aumento monótono de las emisiones en función de los ingresos, desplazándose con el tiempo hacia abajo, lo que es análogo a su escenario de "CAK revisado".

De acuerdo a sus datos, menciona que probable que una innovación concreta se adopte primero preferentemente en los países de renta alta, con un breve desfase antes de que se adopte en la mayoría de los países más pobres. Sin embargo, es posible que las emisiones disminuyan simultáneamente en los países de renta baja y alta a lo largo del tiempo, ceteris paribus, aunque las innovaciones concretas que suelen adoptarse en un momento dado podrían ser diferentes en los distintos países.

En 2009 Halicioglu, examinó empíricamente las relaciones causales dinámicas entre las emisiones de carbono, el consumo de energía, la renta y el comercio exterior en el caso de Turquía utilizando los datos de series temporales para el periodo 1960-2005. Su investigación comprobó la interrelación entre las variables utilizando el procedimiento de la prueba de límites de cointegración. Los resultados indicaron la existencia de dos formas de relación a largo plazo entre las variables. En el caso de la primera forma de relación a largo plazo, las emisiones de carbono están determinadas por el consumo de energía, la renta y el comercio exterior.

En el caso de la segunda relación a largo plazo, la renta viene determinada por las emisiones de carbono, el consumo de energía y el comercio exterior. También se comprueba la estabilidad de los parámetros de la relación a largo plazo de las emisiones de CO<sub>2</sub>, el consumo de energía, la renta y la ecuación del comercio exterior. Los resultados empíricos sugirieron que la renta es la variable más significativa para explicar las emisiones de carbono en Turquía, seguida del consumo de energía y el comercio exterior.

Las pruebas de causalidad de Granger indicaron que existe causalidad de Granger en ambas direcciones entre las emisiones de CO<sub>2</sub> y la renta, tanto a corto como a largo plazo. Por lo tanto, es posible predecir los niveles futuros de estas variables a partir de los niveles pasados de cada una de ellas. La estabilidad de la ecuación de las emisiones de CO<sub>2</sub> sugiere que los cambios políticos que tengan en cuenta las variables explicativas de la ecuación de las emisiones de CO<sub>2</sub> no causarían distorsiones importantes en el nivel de emisiones de CO<sub>2</sub> en el caso de Turquía (Halicioglu, 2009).

Tamazian et al. (2009) utilizando un modelo estándar de forma reducida y controlando la heterogeneidad no observada específica de cada país, investigaron la relación entre calidad medioambiental, desarrollo económico y desarrollo financiero. Al utilizar datos panel del periodo 1992 a 2004, observaron que tanto el desarrollo económico como el financiero son determinantes de la calidad medioambiental en las economías BRIC, mostrando que un mayor grado de desarrollo económico y financiero disminuye la degradación medioambiental.

Su análisis sugirió que la liberalización y la apertura financieras son factores esenciales para la reducción del CO<sub>2</sub>. La adopción de políticas dirigidas a la apertura y liberalización financieras para atraer mayores niveles de inversión extranjera directa relacionada con investigación y desarrollo (I+D) podría reducir la degradación medioambiental en los países considerados. Mostraron además que el desarrollo económico disminuye la degradación

medioambiental con mayores niveles de crecimiento económico, hallazgo que confirmó empíricamente la existencia de la CAK para los países considerados.

En particular, observaron que el desarrollo del mercado de capitales y del sector bancario, junto con unos niveles más elevados de IED, contribuyen a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita. En este sentido, cabe destacar que el gobierno puede ayudar a los mercados estableciendo un marco político sólido que cree valor a largo plazo para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y apoye sistemáticamente el desarrollo de nuevas tecnologías que conduzcan a una economía menos intensiva en carbono (Tamazian et al., 2009).

Sus resultados respaldan las conclusiones de Copeland & Taylor (2004), que afirman que no sería prudente que los países utilizaran la protección comercial como medio para mejorar su medio ambiente. Esto es importante porque un mayor grado de apertura económica y financiera refuerza el marco institucional creando incentivos para que las empresas actúen en consecuencia. Por lo tanto, abordar estas cuestiones podría conducir a una mayor eficiencia energética a través de avances tecnológicos como sugirió Blanford (2009) y posiblemente reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en los países BRIC.

X.-P. Zhang & Cheng (2009) investigaron la existencia y la dirección de la causalidad de Granger entre el crecimiento económico, el consumo de energía y las emisiones de carbono en China, aplicando un modelo multivariante durante el periodo 1960 a 2007. Los resultados empíricos para China sugirieron una causalidad de Granger unidireccional que va del PIB al consumo de energía, y una causalidad de Granger unidireccional que va del consumo de energía a las emisiones de carbono a largo plazo. Sus pruebas mostraron que ni las emisiones de carbono ni el consumo de energía conducen al crecimiento económico.

Acaravci & Ozturk (2010) estudiaron la relación causal entre las emisiones de dióxido de carbono, el consumo de energía y el crecimiento económico utilizando el enfoque de la prueba de límites de cointegración autorregresiva distribuida (ARDL) para diecinueve países europeos.

La prueba F de límites para cointegración aportó pruebas de una relación a largo plazo entre las emisiones de dióxido de carbono per cápita, el consumo de energía per cápita, el producto interior bruto (PIB) real per cápita y el cuadrado del PIB real per cápita sólo para Dinamarca, Alemania, Grecia, Islandia, Italia, Portugal y Suiza. Las pruebas de suma acumulada y suma acumulada de cuadrados también muestran que los parámetros estimados son estables durante el periodo de la muestra (Acaravci & Ozturk, 2010).

Sus resultados respaldaron la validez de la hipótesis de la curva de Kuznets medioambiental en Dinamarca e Italia. Este estudio también explora la relación causal entre las variables utilizando modelos de causalidad de Granger basados en la corrección de errores. Los resultados globales indican que es probable que las políticas de conservación de la energía, como el racionamiento del consumo energético y el control de las emisiones de dióxido de carbono, no tengan efectos adversos sobre el crecimiento de la producción real y que la hipótesis CAK no sea válida para la mayoría de los países considerados en este estudio.

Ozturk & Acaravci (2010) examinaron la relación a largo plazo y causal entre el crecimiento económico, las emisiones de carbono, el consumo de energía y la tasa de empleo en Turquía utilizando el método de la cointegración autorregresiva distribuida. Los resultados empíricos para Turquía durante el periodo 1968 a 2005 sugieren la existencia de una relación a largo plazo entre las variables con un nivel de significación del 5%.

Además, la hipótesis CAK en el marco causal utilizando un modelo logarítmico lineal no es válida en el caso turco. Los resultados globales indican que es probable que las políticas de conservación de la energía, como el racionamiento del consumo energético y el control de las emisiones de dióxido de carbono, no tuvieran efectos adversos sobre el crecimiento de la producción real de Turquía (Ozturk & Acaravci, 2010).

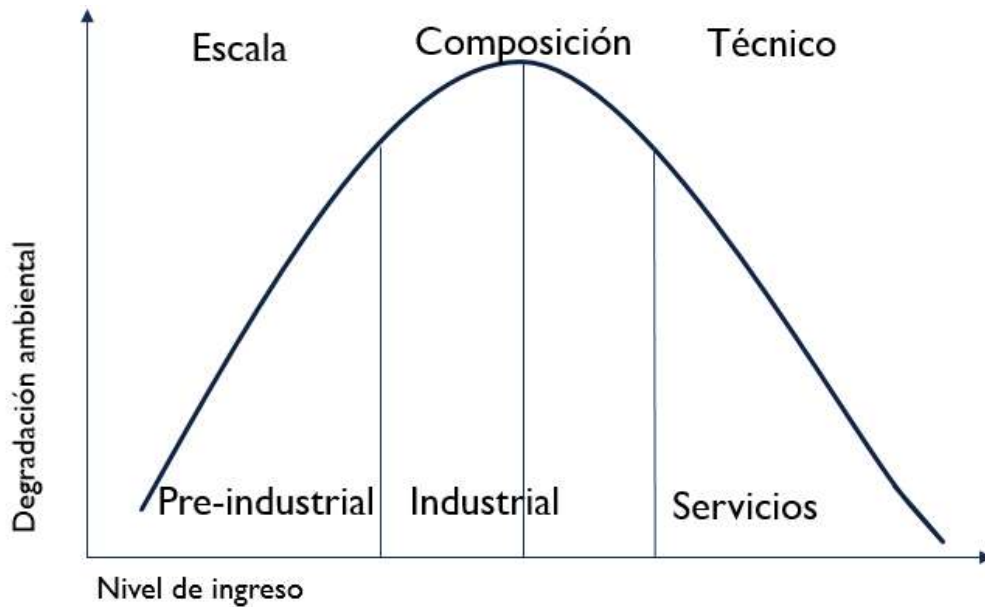
Pao & Tsai (2010) examinó las relaciones causales dinámicas entre las emisiones contaminantes, el consumo de energía y la producción de un grupo de países BRIC durante el periodo 1971 a 2005, excepto Rusia (1990-2005). En el equilibrio a largo plazo, el consumo de energía tuvo un impacto positivo y estadísticamente significativo en las emisiones, mientras que la producción real muestra el patrón en forma de U invertida asociado a la hipótesis de la Curva de Kuznets Medioambiental con un umbral de renta de 5.393 (en logaritmos).

### 3.1.1 Efectos de escala, composición y técnico

A manera de resumen, la CAK afirma que el nexo entre el deterioro medioambiental y el desarrollo económico se produce en tres etapas o por medio de tres efectos, a saber: efectos de escala, composición y técnica (Grossman & Krueger, 1991).

Como se representa en la figura 13, el efecto de escala implica que el desarrollo económico tiene un impacto perjudicial sobre el medio ambiente. Una mayor producción requiere una mayor explotación de los recursos naturales para satisfacer la demanda, lo que aumenta la degradación del medio ambiente. Del mismo modo, el desarrollo económico se caracteriza por un elevado consumo de energía procedente de fuentes de energía fósiles, que siguen siendo más baratas y la opción viable en comparación con las energías renovables.

Figura 13. Curva Ambiental de Kuznets (CAK)



Fuente: Grossman & Krueger (1991) y Panayotou (1993).

La dependencia del consumo de energía procedente de combustibles fósiles para los procesos industriales puede reducir los costes de producción y contribuir a la expansión de los bienes y servicios para satisfacer su creciente demanda, pero impulsa las emisiones relacionadas con la industria (Edenhofer et al., 2011; P. A. Owusu & Asumadu-Sarkodie, 2016).

El efecto de composición implica que el crecimiento económico puede tener un impacto perjudicial y/o de “mejoramiento” en la calidad ambiental, dependiendo del cambio estructural en la economía. La degradación medioambiental tiende a aumentar con el incremento del crecimiento económico a medida que la economía agraria se desplaza hacia industrias intensivas en energía y carbono. A medida que las industrias intensivas en contaminación se contraen y cambian a industrias orientadas a los servicios, la degradación ambiental comienza a disminuir (Grossman & Krueger, 1991, 1995; Panayotou, 1993).



El efecto técnico implica que el desarrollo económico tiene un impacto de “mejoramiento” del medio ambiente. Dado que los países con mayores ingresos tienden a gastar más en investigación y desarrollo, la sustitución de tecnologías contaminantes y obsoletas por tecnologías más limpias y sofisticadas, junto con regulaciones ambientales estrictas y normas industriales, mejorará la calidad ambiental. Así, la hipótesis CAK sugiere que el impacto perjudicial de los niveles de renta sobre el medio ambiente debido al efecto de escala solo se produce en las fases iniciales del desarrollo económico, pero el impacto de mitigación de una combinación de efectos de composición y técnica compensará el daño medioambiental previo. (Grossman & Krueger, 1991, 1995; Panayotou, 1993).

### 3.1.2 Elasticidad renta de la calidad ambiental

La elasticidad renta de la demanda de calidad medioambiental es el cambio proporcional en la demanda de calidad medioambiental por el cambio proporcional en el nivel de renta. La gente opta por un nivel de vida más alto y está dispuesta a pagar por un medio ambiente más limpio a medida que aumenta su nivel de ingresos. A mayor nivel de ingresos, la gente intuitivamente anhela más la calidad que la cantidad y se preocupa más por el medio ambiente (Baldwin, 1995).

Por ello, exigen mejores servicios medioambientales, lo que induce un cambio estructural en la economía y, en consecuencia, una disminución del deterioro medioambiental. En relación con la CAK, un mayor nivel de ingresos tiende gradualmente a cambiar los patrones de comportamiento y los estilos de vida hacia productos que consumen mucha energía y carbono. El comportamiento de consumo de los ricos se inclina hacia productos y servicios energéticamente eficientes (Girod et al., 2014).

### 3.1.3 Comercio internacional

La política comercial es uno de los factores importantes que explican la hipótesis CAK. La liberalización del comercio hace que los países se especialicen en sectores en los que tienen una ventaja competitiva. Si el sector con una ventaja competitiva se deriva de una normativa medioambiental laxa, entonces el efecto de la liberalización del comercio perjudicará al medio ambiente, porque cada país se especializará en sectores con una normativa medioambiental débil y abandonará la producción industrial con un alto coste de reducción de la contaminación (Grossman & Krueger, 1991).

El efecto neto de los niveles de contaminación dependerá de la situación de las industrias intensivas en contaminación y de la normativa medioambiental vigente. La liberalización del comercio, a través del efecto composición, puede atribuirse a la hipótesis del refugio de la contaminación, aunque el libre comercio puede ser beneficioso al crear puestos de trabajo, mejorar las cualificaciones y aumentar los niveles de renta, lo que, a su vez, contribuirá a un medio ambiente más limpio. Sin embargo, si las normativas medioambientales de los países en desarrollo son débiles, atraen un desplazamiento de industrias contaminantes e intensivas en energía desde los países desarrollados.

Así pues, la hipótesis del paraíso de la contaminación postula que los países de ingresos altos con normas medioambientales estrictas trasladarán sus industrias intensivas en contaminación a países pobres con políticas de contaminación medioambiental laxas (Solarin et al., 2017).

Del mismo modo, si la innovación, la investigación y el desarrollo, y las tecnologías limpias y modernas se transfieren a través de la inversión extranjera directa de los países desarrollados a los países en desarrollo, las tecnologías antiguas pueden sustituirse para

reducir el nivel de contaminación. La hipótesis del paraíso de contaminación se aborda con mayor profundidad en la siguiente sección.

### 3.2 La hipótesis del paraíso de contaminación

De acuerdo a autores como Gill et al. (2018) refieren que la hipótesis del paraíso de contaminación fue postulada por primera vez por Copeland & Taylor en 1994, sin embargo, esta afirmación puede estar equivocada. Esta investigación encuentra, que desde principios de la década de 1970 ya existía un activo debate sobre la relocalización de industrias debido al endurecimiento de la normativa medioambiental. Incluso el término “*pollution havens*” pudo rastrearse a la que parece ser su utilización por primera vez en el año de 1967 por parte del entonces gobernador de Nueva York, Nelson Rockefeller.

El término se encuentra citado en una publicación de la *Royal Society of Health* (hoy día, *Royal Society for Public Health*) titulado “*States Co-operate to Fight Air Pollution*” escrito por el Comisionado Adjunto del Departamento de Salud del Estado de Nueva York, Dwight f. Metzler en 1968. El contexto en el que aparece la referencia es el que sigue.

A raíz de una serie de datos acumulados en investigaciones sobre el transporte interestatal de contaminantes llevadas a cabo por la Comisión, el Gobernador del Estado de Nueva York, Nelson Rockefeller, presentó una solicitud al Secretario del Departamento de Salud, Educación y Bienestar para que convocara una conferencia sobre la contaminación atmosférica interestatal en el área metropolitana, basándose en que la contaminación procedente de Nueva Jersey estaba afectando negativamente a la salud y el bienestar de la población del Estado de Nueva York.

Tras recibir esta solicitud del gobernador Rockefeller, el secretario inició su propia averiguación y consultó a los estados de Nueva York y Nueva Jersey, basándose en que la contaminación atmosférica originada en Nueva York estaba afectando negativamente a la

salud y el bienestar de los residentes de Nueva Jersey. Tras las consultas, se decidió estudiar, en la conferencia inicial, el flujo de contaminación en ambos sentidos a través de la frontera estatal y considerar sólo dos contaminantes, el óxido de azufre y el monóxido de carbono (Metzler, 1968).

Tras nueve días de conferencia durante enero de 1967, en los que se esbozaron los aspectos técnicos del problema de los óxidos de azufre y los monóxidos de carbono en la región metropolitana, los conferenciantes y el Secretario de Salud, hicieron siete recomendaciones a los estados.

Seis de ellas se referían al control de los óxidos de azufre, el monóxido de carbono y las emisiones de una fuente puntual situada en Nueva Jersey y la séptima se refería a la creación de un organismo interestatal de control de la contaminación atmosférica.

Por su parte, el gobernador Rockefeller informó a la conferencia sobre reducción de la contaminación que los gobernadores de Nueva Jersey, Pensilvania, Delaware y Nueva York, en una reciente conferencia de gobernadores, habían acordado elaborar normas y procedimientos de aplicación comunes en el campo del control de la contaminación atmosférica para que no hubiera “paraísos de contaminación a partir de la legislación de aplicación” (Metzler, 1968, p. 77).

Si bien es cierto, el objetivo del Gobernador no era establecer el término que un poco más tarde los investigadores tomarían para el desarrollo teórico y empírico de lo que hoy se conoce como la hipótesis del paraíso de contaminación, su expresión sí refleja la preocupación sobre los crecientes niveles de contaminación y emisiones que desde esa década hasta nuestros días son el centro del debate en las agendas internacionales de los países.

Por ejemplo, en 1973 Ferguson, en el contexto de los esfuerzos de control de la contaminación de la industria estadounidense de la época, dijo que, estos esfuerzos exigirán importantes ajustes en la economía nacional y que aunque todavía no se podía determinar la naturaleza y el alcance exactos de estos ajustes, una consecuencia inmediata en muchas industrias había sido la canalización de fondos que normalmente se destinan a la modernización y expansión, hacia la compra y mantenimiento de instalaciones de equipos anticontaminación.

Esta desventaja competitiva puede dar lugar a un aumento de la presión para levantar nuevas barreras comerciales destinadas a proteger la industria estadounidense. Los esfuerzos de control de la contaminación diferirán entre las naciones según la capacidad de asimilación del medio ambiente de cada país, el equilibrio relativo de sus objetivos económicos y sociales nacionales y sus niveles tecnológicos e industriales. El coste de producción en los distintos países reflejará estas diferencias en los factores de control de la contaminación.

La aceptación internacional de declaraciones políticas generales no aporta ninguna solución real al problema mundial de la contaminación. Cualquier modificación de la política medioambiental que provoque repercusiones económicas generará una intensa reacción, especialmente entre las naciones en desarrollo. Puede que las normas de control de la contaminación, en cualquiera de sus formas, sólo sean posibles en áreas económicas estrechamente definidas entre un número limitado de naciones con intereses similares.

A la luz de esta diversidad de circunstancias económicas, sociales y medioambientales nacionales, no es sorprendente que algunos países ya se estén estableciendo como “paraísos de la contaminación” (Ferguson, 1973, p. 374). Las normas laxas de control de la contaminación ayudarán sin duda a las naciones industrialmente inmaduras que, debido a su ineficacia, tecnología menos avanzada o diseconomías de escala, sufren en la

competencia comercial con los países desarrollados. Es decir, el rebajar las normas ambientales sería su fuente ventaja competitiva. Aunque esta ventaja comercial puede ser sólo temporal, los países en desarrollo pueden aceptar de buen grado una política de corto alcance que permita el deterioro medioambiental como coste necesario de la industrialización (Ferguson, 1973).

En 1974, Conroy afirmaba que en la literatura sobre cuestiones medioambientales era frecuente la referencia a la posibilidad de que los costes de la reducción de la contaminación provoquen una reorientación de la inversión. Conroy cita a Ingo Walter, al indicar que cabría esperar que las presiones medioambientales promovieran un desplazamiento gradual de las nuevas inversiones de los países de renta alta a los de renta baja.

También cita a los informes de comercio internacional del GATT de 1971 donde visualizaron que los costes podrían tener un efecto material y que la mayoría de las industrias contaminantes, enfrentadas a normas más exigentes, tenderían gradualmente a salir de los países con costes relativamente elevados y todo el proceso de especialización industrial cambiaría.

Brasil se mencionaba a menudo en los debates sobre países que atraen industrias ofertando paraísos de contaminación, al igual que los paraísos fiscales fueron utilizados por algunos países en el pasado e incluso ahora. Los países menos desarrollados parecen tener opiniones diferentes sobre el fomento de las industrias “sucias” en su país. Algunos creen que su necesidad de crecimiento es tan importante y/o que la capacidad de asimilación de su medio ambiente es tan grande que la contaminación no puede ser una preocupación en este momento (Conroy, 1974).

En ese mismo año, Barnett & Müller (1974), abordaron la discusión a nivel de la firma a partir de la investigación del entonces experto en medio ambiente de la ONU John Welles. Su

investigación decía que muchas empresas gastan más en anunciar su preocupación o en afirmar que la contaminación es inevitable, que en controlar sus residuos contaminantes. John Welles entrevistó a un centenar de directivos de empresas mundiales sobre cuestiones de contaminación y resume su dilema común: “Por supuesto que deberíamos hacer más para limpiar nuestros contaminantes, pero ¿cómo podemos permitirnoslo cuando nuestra competencia nacional e internacional no lo hace?”. Sobre todo, en el caso de las plantas antiguas, es probable que el coste de reducir la contaminación sea prohibitivo.

La investigación de Welles sugería que, en el caso de plantas muy contaminantes como las de fundición y refinado de metales no férreos, los paraísos de la contaminación del mundo en vías de desarrollado iban a ofrecer una respuesta y como ejemplo citan el anuncio de un periódico de la ciudad de México en el que se escribiría (según ellos): “Relax. Ya te hemos preparado el terreno. Si está pensando en huir de la capital porque las nuevas leyes de prevención y control de la contaminación ambiental afectan a su planta, puede contar con nosotros” (Barnet & Müller, 1974, p. 345).

Dijeron por tanto que la utilización de “paraísos de contaminación” ya se encontraba muy avanzada. Hay docenas de refinerías a lo largo de las 1 700 millas de costa caribeña. Un complejo petroquímico en la costa sur de Puerto Rico arroja nubes de humo hasta 90 millas de distancia. La encantadora isla de Santa Cruz, según el presidente de la Asociación para la Conservación del Caribe, “recibe ahora vertidos de petróleo dos o tres veces por semana”.

Pero ni los paraísos de la contaminación, ni las campañas de relaciones públicas, ni las inversiones relativamente modestas que pueden permitirse en control de la contaminación resolverán el problema para las corporaciones globales. Como dijo a Welles un encargado de una empresa de eliminación de residuos: los presidentes de algunas de las mayores

empresas del mundo señalan con orgullo en sus discursos lo que están haciendo para limpiar el medio ambiente. Lo que no saben es que algunos de sus jefes de planta siguen vertiendo veneno a los ríos o enviándolo por las chimeneas... por la noche.

En ese sentido, equiparan la lógica de colocar a los fabricantes de armas en el Pentágono y a los banqueros en el Tesoro, a la misma acción de que los principales contaminadores fueran los responsables del cuidado del medio ambiente. Su experiencia es innegable, pero su incentivo para evaluar la parte que le corresponde a la industria del coste de la reforma medioambiental es dudoso.

El hecho de que la política medioambiental esté tan claramente adaptada a los intereses de las corporaciones globales refleja un compromiso nacional continuado con las formas tradicionales de crecimiento. Nada sugiere tan claramente el poder de las corporaciones como su continua capacidad para gastar el capital social de la nación (su aire, su agua y su tierra) para la acumulación de capital financiero (Barnet & Müller, 1974).

Agarwal (1976) examinó el papel de las inversiones privadas extranjeras en los recursos naturales de los países en desarrollo a la luz de sus políticas. Pero, en comparación con la definición tradicional de recursos naturales, concibe una definición de forma más amplia. Incluyendo: (1) minerales, fuentes de energía, bosques, etc., y (2) aire, ríos, océanos, energía solar, clima y otros componentes medioambientales que determinan la capacidad de absorción de la naturaleza para el crecimiento industrial y la contaminación. Los recursos naturales del primer grupo se denominan aquí recursos no renovables o agotables y los del segundo, recursos medioambientales.

Dependiendo de los controles de la contaminación, la resistencia pública o la actitud de los sindicatos, las industrias que contaminan intensamente (por ejemplo, las industrias petroquímica, metalúrgica, papelera y de la pasta de papel) trasladarán sus plantas



existentes o dejarán que se desgasten e invertirán en nuevas plantas en los llamados “paraísos de la contaminación” de los países en desarrollo (Agarwal, 1976, p. 18).

La selección de los países en desarrollo para las inversiones en recursos medioambientales por parte de los inversores extranjeros se verá influida, como cualquier otra inversión, por una serie de factores como, por ejemplo, la oferta local de insumos complementarios, el nivel salarial, la estabilidad política, el mercado de capitales, la actitud hacia las inversiones extranjeras, la política de divisas, los incentivos monetarios y fiscales para las inversiones y las exportaciones, la demanda nacional del producto, los servicios bancarios, de seguros y otras infraestructuras (Agarwal, 1976).

Williams (1983) en su artículo analizó los fundamentos y la teoría en que se basa el uso de los procedimientos de ordenación del territorio para controlar el desarrollo potencialmente contaminante, así como la necesidad de armonizar los procedimientos dentro de las Comunidades Europeas para evitar la aparición de paraísos de contaminación.

Williams hace hincapié en dos principios subyacentes al programa de medio ambiente de la CE, a saber, que más vale prevenir que curar, y que quien contamina paga por los controles de emisiones u otras medidas anticontaminación necesarias para su proyecto de desarrollo. El primer principio conduce lógicamente a la adopción de procedimientos de control del uso del suelo. El segundo principio puede tentar a un directivo a buscar una ubicación, *ceteris paribus*, donde las normas de calidad ambiental sean más débiles, o los controles de planificación o los procedimientos de aplicación menos adecuados. En otras palabras, pueden surgir paraísos de contaminación (Williams, 1983, p. 55).

Señalan que la disposición de un contaminador potencial a asumir los costes adicionales impuestos como consecuencia de la obligación de adoptar medidas de control de la contaminación depende de dónde residan los intereses económicos del directivo. En el caso

de una empresa multinacional o con movilidad geográfica, es probable que tenga la tentación de proponer una ubicación alternativa donde los requisitos de control de la contaminación sean menos estrictos y menos costosos (Williams, 1983).

Esta tentación puede ser especialmente fuerte si la ubicación alternativa ofrece un acceso igual de bueno al mismo mercado. En ese caso, pueden seguir existiendo “paraísos de la contaminación” en los que los controles de la contaminación se apliquen de forma menos estricta, ya sea por razones políticas o de procedimiento, y en los que, por lo tanto, tiendan a localizarse las actividades contaminantes (Williams, 1983, p. 56).

Birdsall & Wheeler (1993) la preocupación que analizaron en su documento, es que el libre comercio aumente la contaminación industrial en los países en desarrollo, a través del desplazamiento de las industrias sucias de los países desarrollados con una regulación medioambiental más estricta, y a través de la presión competitiva sobre los países en desarrollo para que reduzcan aún más sus normas medioambientales.

La cuestión que abordaron fue: entre los países de América Latina, ¿se ha asociado una mayor "apertura", definida en términos de comercio e inversión extranjera, con un desarrollo industrial intensivo en contaminación? En términos más generales, ¿es probable que las economías abiertas sean paraísos de contaminación?

Según Birdsall & Wheeler (1993) hay al menos tres razones para esperar una mayor intensidad de la contaminación, es decir, más contaminación por unidad de producción) en los países en desarrollo.

a) Los servicios medioambientales son bienes normales; una mayor renta en los países desarrollados produce una mayor demanda de aire y agua limpios. Del mismo modo, a niveles de renta más bajos y tasas de descuento más altas, la ganancia de rentas y los

puestos de trabajo pueden valorarse más en relación con la salud y otros costes de la contaminación.

b) Los costes relativos de controlar y hacer cumplir las normas de contaminación son mayores en los países en desarrollo, dada la escasez de personal cualificado, la dificultad de adquirir equipos sofisticados y los elevados costes marginales de emprender cualquier nueva actividad gubernamental cuando la política se centra en reducir las cargas fiscales.

c) El crecimiento en los países en vías de desarrollo está asociado a un cambio de la agricultura a la industria, con un rápido crecimiento urbano y una fuerte inversión en infraestructuras urbanas; es más probable que esto implique un aumento de los niveles de contaminación por cada unidad de producción. En los países desarrollados, por el contrario, el crecimiento se asocia a un desplazamiento de la industria hacia los servicios y, por tanto, a una disminución de los niveles de contaminación por cada unidad de producción.

Estas diferencias estructurales son coherentes con las diferencias en las ventajas comparativas y se verían reforzadas por el libre comercio. Por estas razones, el aumento de la intensidad de la contaminación en los países en desarrollo podría reflejar simplemente diferencias entre los países en cuanto a la ventaja comparativa del coste social de las distintas combinaciones de actividades contaminantes (Birdsall & Wheeler, 1993).

Por otro lado, Bommer (1995) cuestionó que la deslocalización de las inversiones esté siempre causada por una menor competitividad en el país de origen. Utilizando un enfoque de señalización, demostró que la deslocalización puede llevarse a cabo por razones puramente estratégicas.

Afirmó que un empresario puede deslocalizar la producción por razones estratégicas y no debido a una pérdida real de competitividad si espera un endurecimiento de la normativa medioambiental en el futuro. La fuga de capitales tiene por objeto señalar al responsable

político los daños debidos a un mayor control medioambiental que podrían producirse o no en la realidad. La fuga de capitales por motivos estratégicos es posible porque el gobierno no está seguro de la capacidad del productor para adaptarse a la normativa medioambiental.

Que se produzca una fuga de capitales estratégica depende del coste de la acción estratégica del productor. Su coste es bajo si la sustitución de la tecnología “limpia” por la tecnología “sucia” y por inversiones de capital en el extranjero sólo provoca una pequeña disminución de los beneficios. En este caso, la fuga estratégica de capitales tiene el potencial de aumentar los beneficios totales. Sacrificar la tecnología “limpia” es más fácil cuanto menos capital requiere la tecnología “sucia”, con la consecuencia de que se puede invertir más capital en el extranjero de forma rentable (Bommer, 1995).

A inicios de la década, Letchumanan & Kodama (2000) investigaron la validez de la hipótesis del paraíso de la contaminación, en el contexto que afirmaba que un régimen mercado abierto fomentaría el flujo de industrias contaminantes, generalmente de baja tecnología, hacia los países en desarrollo desde una perspectiva de comercio *neotecnológico*. En el proceso, establecieron una trayectoria emergente de transferencia internacional de tecnología que favorece a las industrias de alta tecnología.

El documento concluye que las medidas positivas que fomentan la IED no sólo son cruciales para la modernización tecnológica, sino que al mismo tiempo generan un mayor bienestar medioambiental gracias a la transferencia de productos y procesos de producción respetuosos con el medio ambiente. La especialización relativa en industrias más limpias desde el punto de vista medioambiental por parte de los países en desarrollo puede explicarse por la mayor movilidad de las industrias de alta tecnología debido a las mejoras tecnológicas en los procesos y en la estructura de los productos.

Este hecho se estableció analizando las innovaciones tecnológicas en dos productos, el televisor y la cámara fotográfica. Se demostró que la simplificación de la estructura del producto, el uso de nuevos materiales y la amplia automatización de los procesos pueden haber facilitado la localización transfronteriza de estas industrias. De hecho, la automatización ha reducido drásticamente la necesidad de mano de obra altamente cualificada y, por tanto, ha facilitado la localización de dichas industrias en países en desarrollo que, por lo general, carecen de tales cualificaciones (Letchumanan & Kodama, 2000).

Eskeland & Harrison (2003) presentaron pruebas sobre si las multinacionales estaban acudiendo en masa a los “paraísos de la contaminación” de los países en desarrollo. Aunque encontraron pruebas de que los inversores extranjeros se localizan en sectores con altos niveles de contaminación atmosférica, las pruebas eran débiles en el mejor de los casos. A continuación, examinaron si las empresas extranjeras contaminan menos que sus homólogas encontrando que las fábricas extranjeras son mucho más eficientes desde el punto de vista energético y utilizan tipos de energía menos contaminantes.

Su documento comenzó examinando el patrón de inversión extranjera en cuatro países en desarrollo: México, Venezuela, Marruecos y Costa de Marfil. Después, investigaron si dentro de los sectores, existe alguna tendencia a que las empresas extranjeras contaminen menos o más que sus homólogas locales. Su indicador de la intensidad de la contaminación fue el uso de energía y “combustibles sucios”, descubriendo entonces que las plantas extranjeras son mucho más eficientes desde el punto de vista energético y utilizan tipos de energía menos contaminantes.

Cole (2004) estudió hasta qué punto la relación U invertida de la CAK puede explicarse por el comercio y, en concreto, por la migración o el desplazamiento de las industrias “sucias” de las regiones desarrolladas a las regiones en desarrollo Utilizando datos detallados sobre

los flujos comerciales Norte-Sur de productos intensivos en contaminación, evaluando así la relación con la PHH. Encontró pruebas de efectos de refugio de la contaminación, aunque tales efectos no parecían ser generalizados y fueron relativamente pequeños en comparación con los papeles desempeñados por otras variables explicativas.

Una vez controlados el cambio estructural, la renta y los posibles efectos de refugio de la contaminación, la apertura comercial mostró una relación negativa y estadísticamente significativa con la contaminación. Siendo un tanto especulativos, esto puede deberse a la eficiencia de los recursos derivada de una mayor competitividad o de un mayor acceso a tecnologías de producción “más ecológicas” (Cole, 2004).

Por lo tanto, el descenso de las emisiones experimentado en los niveles de renta más altos parece ser el resultado de una mayor demanda de normativas medioambientales y de un aumento de la inversión en tecnologías de reducción (ambos facilitados por los niveles de renta más altos), de la apertura comercial, del cambio estructural en forma de una cuota decreciente de la producción manufacturera y de un aumento de las importaciones de producción intensiva en contaminación.

Millimet & List (2004) utilizaron el método del emparejamiento para demostrar que el impacto de una normativa más estricta es heterogéneo desde el punto de vista espacial y varía sistemáticamente en función de los atributos específicos de cada lugar. Por lo tanto, los estudios anteriores que suponían una respuesta homogénea pueden enmascarar inadvertidamente el impacto global de una normativa más estricta al agrupar regiones afectadas y no afectadas.

En general, sus resultados mostraron que los costes estimados, de unos controles más estrictos de la calidad del aire son bastante heterogéneos desde el punto de vista espacial, mientras que algunas regiones experimentarán un efecto nocivo escaso o nulo, otras

sufrirán pérdidas considerables. Intuyeron que una vez que se tenga en cuenta toda la heterogeneidad, los resultados empíricos empezarán a coincidir con lo esperado.

En el 2005 Taylor analizó las contribuciones teóricas y empíricas recientes que investigaban la PHH. Menciona que, si bien es razonable suponer que la mano de obra cualificada y el capital son bastante móviles (en Estados Unidos), de modo que las grandes diferencias en las normativas pueden traducirse en grandes cambios en la localización de la producción, no se debe extender esta conclusión a los cambios de producción entre países diferenciados mucho más marcadamente en dotaciones, tecnologías y recursos. Ante ello, hace una distinción entre un “efecto paraíso de contaminación” y un “apoyo a la PHH”.

Aunque los estudios basados en datos estadounidenses proporcionaron algunas de las pruebas más convincentes de un impacto normativo en la actividad económica (es decir, un efecto paraíso de contaminación), las pruebas convincentes a favor o en contra de la PHH deben emplear datos internacionales. Por desgracia, no es fácil sopesar todos los factores relevantes. De hecho, ningún estudio en la literatura proporciona una prueba convincente de la PHH en muchos países (Taylor, 2005).

Intuyó que una prueba plenamente convincente de la hipótesis requiere datos sobre la dotación de factores y la normativa tanto del país de origen como del país socio (para sopesar los diversos motivos del comercio), los flujos comerciales, información agregada sobre la política del resto del mundo y variables de dotación de factores (para garantizar que se tienen en cuenta los efectos de terceros países), junto con una fuente de variación exógena de la política comercial.

En 2008, Ben Kheder & Zugravu-Soilita estudiaron la hipótesis desde una nueva perspectiva tanto teórica como empírica. Aplicando un modelo de economía geográfica a datos de empresas francesas, confirmaron la hipótesis de la PHH. Mediante un análisis de

sensibilidad, también fue válida para los países de Europa Central y Oriental, los países emergentes y los países de renta alta de la OCDE, pero no para la mayor parte de los países de la Comunidad de Estados Independientes. Por último, mostraron que la PHH se confirma de la manera más contundente para las economías emergentes.

En 2009 Wagner & Timmins comprobaron la PHH utilizando datos de panel sobre los flujos de salida de inversión extranjera directa (IED) de varias industrias del sector manufacturero alemán, demostrando que las externalidades asociadas a la aglomeración de IED pueden desviar las estimaciones de la constatación de un efecto de paraíso de la contaminación si se omiten en el análisis. Al tener en cuenta estos aspectos, encontraron pruebas sólidas de un efecto de paraíso de la contaminación para la industria química de ese país.

Sus resultados subrayaron la importancia de controlar las externalidades de aglomeración, representadas por la IED acumulada, y demuestran que omitirlas del análisis puede enmascarar el efecto refugio de la contaminación. Cuando se tienen debidamente en cuenta esos efectos, se encuentran pruebas estadística y económicamente significativas de que una normativa medioambiental más estricta disuade la IED en la industria química. No se encuentra tal efecto para otras dos industrias intensivas en contaminación, los metales primarios y el papel (Wagner & Timmins, 2009).

Conjeturaron que la falta de efecto se debe en parte a problemas de agregación y a la falta de movilidad geográfica de algunas industrias intensivas en contaminación documentada por Ederington et al. (2005). Además, a medida que se disponga de datos más desagregados sobre la IED, será posible controlar la integración vertical de procesos de producción con intensidades de contaminación muy diferentes.

Al siguiente año, Kearsley & Riddell (2010) abordaron en la rama de la literatura sobre la CAK centrada en el papel que desempeña el comercio internacional en la configuración de



esta relación. Es decir, probaron la hipótesis del paraíso de la contaminación. Estimaron CAK's de siete contaminantes en 27 países desarrollados de la OCDE hallando pocos indicios de que los paraísos de la contaminación desempeñen un papel significativo en la configuración de la CAK.

También observaron que los intervalos de confianza en torno a los puntos de inflexión de la CAK son muy amplios y a menudo incluyen valores muy por encima del rango de los datos. Esto los llevó a ser escépticos ante la visión optimista de que el crecimiento económico conduce de forma natural a mejoras en la calidad medioambiental.

Los resultados de las regresiones indicaron que la apertura comercial no suele estar correlacionada con un aumento de las emisiones. Además, sólo encontraron pruebas estadísticas muy débiles de que las importaciones sucias están correlacionadas con mayores emisiones. Estos resultados los llevaron a rechazar la PHH, contrariamente a la evaluación de los datos realizada por Cole (2004).

Por otro lado, en la mayoría de los modelos, el límite superior de la confianza cae fuera del rango de los datos, por lo que no se puede distinguir entre los modelos que implican puntos de inflexión muy altos y aquellos en los que la emisión marginal es aproximadamente cero en niveles de renta altos. Este resultado es coherente con la conclusión de Holtz-Eakin & Selden (1992) de que la propensión marginal de un país a emitir CO<sub>2</sub> tiende a cero a medida que aumentan los ingresos, en lugar de volverse negativa.

En resumen, los amplios intervalos de confianza ofrecen poco apoyo a la visión optimista de que el crecimiento de la renta conduce de forma natural a una reducción de las emisiones una vez alcanzado un cierto pico de emisiones per cápita. Podría ser que los resultados de las relaciones CAK cuadráticas en otros estudios sean simples artefactos estadísticos. En

conjunto, los aparentes amplios intervalos de confianza tienen importantes implicaciones para la previsión de emisiones (Kearsley & Riddel, 2010).

Los modelos de previsión de emisiones basados en relaciones CAK estimadas serán, por lo general, previsiones de muy baja precisión. En consecuencia, los investigadores deben desconfiar de la baja precisión en las estimaciones de picos que ofrecen estos modelos e incorporar explícitamente ese error en la evaluación del error de previsión de emisiones.

En 2017 Solarin et al. investigaron la PHH en Ghana utilizando la emisión de CO<sub>2</sub> como indicador de la contaminación atmosférica para el período 1980 a 2012 y como variables independientes el producto interior bruto, su término cuadrado, el consumo de energía, el consumo de energía renovable, el consumo de energía de combustibles fósiles, la inversión extranjera directa, la calidad institucional, la urbanización y la apertura comercial como sus principales determinantes. Para sus objetivos establecieron diferentes modelos de series temporales utilizando el método ARDL de límites para cointegración.

El resultado de esta investigación reveló la existencia de cointegración, lo que indicó la existencia de una relación a largo plazo entre las variables. Además, el PIB, la inversión extranjera directa, la población urbana, el desarrollo financiero y el comercio internacional tienen un impacto positivo en la emisión de CO<sub>2</sub>, mientras que la calidad institucional disminuye las emisiones en Ghana lo que indicó la existencia de la PHH en Ghana.

Finalmente (para la sección), según Gill et al. (2018), hay otros argumentos en contra de la teoría, los supuestos y las implicaciones de la PHH. Estos argumentos son los siguientes

a. Se argumenta que las empresas, al trasladarse a un país con una normativa medioambiental laxa, también tienen en cuenta que la contaminación reduce la productividad de la mano de obra, lo que puede aumentar el coste laboral de la empresa.

b. En segundo lugar, las empresas también tienen en cuenta el enorme coste hundido cuando deciden trasladar la operación de producción a otro país.

c. En tercer lugar, los países con normativas medioambientales laxas suelen tener un sistema jurídico débil y leyes comerciales mal definidas. En cambio, los inversores de los países desarrollados prefieren los países que tienen normativas claras y una aplicación eficaz de las leyes. Por lo tanto, es probable que eviten invertir en aquellos países que tienen normativas medioambientales laxas.

d. En cuarto lugar, también se argumenta que los flujos de comercio e inversión están impulsados por la dotación de factores, especialmente los que fluyen del Norte al Sur (Ethier, 1982; Helpman, 1984; Markusen, 1984). La teoría de la dotación de factores afirmaba que las empresas intensivas en capital tienden a invertir en los países con abundancia de mano de obra, mientras que las empresas intensivas en mano de obra tienden a invertir en los países con abundancia de capital.

Sin embargo, el sector intensivo en capital se considera un sector típicamente contaminante y los países con abundancia de capital son los que tienen normativas medioambientales más estrictas. Por lo tanto, la hipótesis capital-trabajo (KLH) parece producir patrones de comercio e inversión opuestos a la PHH. La KLH implica que el Norte con abundancia de capital se especializará y exportará bienes intensivos en capital que también son intensivos en contaminación y el Sur con abundancia de mano de obra se especializará y exportará bienes intensivos en mano de obra que son menos intensivos en contaminación.

e. En quinto lugar, la PH de Porter y van der Linde (1995) es otro argumento en contra de la PHH. Según esta hipótesis, las normativas medioambientales más estrictas en el país de origen inducen la inducción de tecnologías más limpias y eficientes. Estas tecnologías

limpias y eficientes reducen el coste marginal y aumentan la productividad de las empresas, por lo que éstas se vuelven más competitivas.

f. En sexto lugar, según Letchumanan & Kodama (2000), la mayoría de los trabajos sobre la PHH se basan en la teoría neoclásica de la ventaja comparativa, que trata el medio ambiente como otro factor que conlleva una ventaja comparativa de costes. La teoría neoclásica de la ventaja comparativa no tiene en cuenta factores dinámicos como la innovación, la tecnología, el acceso al mercado y la asociación estratégica, que ejercen un efecto más significativo sobre la competitividad de la exportación que los factores de las ventajas comparativas de costes.

g. Por último, la hipótesis del paraíso verde (GHH) afirma que las industrias intensivas en capital y contaminación también se preocupan por su responsabilidad social corporativa. También siguen la triple cuenta de resultados (las personas, los beneficios y el planeta) y mantienen su reputación ecológica, por lo que contribuyen a minimizar las huellas ecológicas (Herzig & Schaltegger, 2006; Willis, 2003).

Estos argumentos opuestos explican por qué la literatura empírica sobre la PHH tiene resultados dispares. Por lo tanto, ha habido una motivación constante para que los investigadores busquen pruebas empíricas de la PHH.

#### **Capítulo IV. Estudios empíricos sobre la CAK y la PHH**

*Para sus contemporáneos, las ideas presentadas por Copérnico no eran mucho más fáciles de usar que la teoría geocéntrica, por ejemplo 45 años después de la publicación de la obra, el astrónomo Tycho Brahe llegó a construir una cosmología exactamente equivalente a la de Copérnico, pero con la Tierra fija en el centro de la esfera celeste en lugar del Sol. Además, las ideas presentadas, tampoco produjeron predicciones más precisas de las posiciones planetarias (Kuhn, 1996).*

*Copérnico era consciente de esto y no pudo presentar ninguna evidencia observacional, sino que se basó en argumentos sobre lo que sería un sistema más completo y elegante, adicionalmente. Los argumentos de Tycho Brahe contra Copérnico son ilustrativos de los fundamentos físicos, teológicos e incluso astronómicos por los que se rechazó la cosmología heliocéntrica. Brahe, posiblemente el astrónomo más destacado de ese tiempo, apreciaba la elegancia del sistema copernicano, pero se oponía a la idea de una Tierra en movimiento basándose en la física, la astronomía y la religión.*

*Entonces Brahe dijo, que el sistema copernicano "... elude de manera experta y completa todo lo superfluo o discordante en el sistema de Ptolomeo. En ningún momento ofende el principio de las matemáticas. Sin embargo, atribuye a la Tierra, ese cuerpo descomunal y perezoso, incapaz de moverse, un movimiento tan rápido como el de las antorchas etéreas, un movimiento triple" (Gingerich, 1993, p. 181). De este modo, muchos astrónomos aceptaron algunos aspectos de la teoría de Copérnico a expensas de otros.*

El objetivo de este capítulo es revisar los estudios empíricos más recientes que han probado los enfoques teóricos de la CAK y la PHH, así como identificar los estudios empíricos específicos para el caso de México.

#### 4.1 Revisión de literatura empírica sobre la CAK y PHH

Desde su creación, la CAK y la PHH ha sido objeto de continuo debate, especialmente en las décadas recientes, una gran cantidad de investigadores han estudiado su validez en distintos países y regiones. Sin embargo, la preocupación por su validez empírica sigue siendo ambigua. Los estudios realizados han utilizado diferentes metodologías, conjuntos de datos, indicadores de daños medioambientales y una amplia muestra de países y regiones, arrojando un amplio espectro de resultados contradictorios.

Por ejemplo Bashir (2022) evaluó la dinámica de la investigación en el campo de la PHH utilizando un análisis bibliométrico para examinar la literatura científica publicada entre 1999 y 2021, lo que arrojó 494 artículos. El objetivo principal fue identificar las tendencias de investigación predominantes. En este contexto, señaló las limitaciones de la bibliografía existente para sugerir nuevas políticas que permitan superar los problemas medioambientales en el marco de los recientes acuerdos sobre el clima:

(i) Los problemas de degradación medioambiental están influidos por varios indicadores. El análisis señala que la mayor parte de la literatura sobre PHH se limita a la urbanización, las energías renovables, la inversión extranjera directa y la complejidad económica. Por lo cual propone que futuros estudios amplíen la literatura existente investigando cómo pueden influir en los problemas medioambientales las innovaciones tecnológicas, la diversificación comercial, el capital humano, los recursos naturales y la calidad de las exportaciones.

(ii) Otra dimensión de la investigación aportará conclusiones empíricas novedosas y sólidas investigando los datos a nivel regional, ya que los acuerdos de cooperación comercial afectan a la cooperación económica y medioambiental.

(iii) Sostuvieron que el metaanálisis proporcionará resultados interesantes que ayudarán a resumir la contribución de la investigación y a influir positivamente en la investigación existente mediante el análisis moderador a través de múltiples estudios.

En el campo de la CAK, Saqib & Benhmad (2021) llevaron a cabo uno de los primeros esfuerzos de sintetizar esta literatura utilizando métodos cuantitativos por medio de un meta-análisis. Al revisar 101 artículos de investigación publicados de 2006 a 2019, hallaron que alrededor del 57% de la bibliografía confirma la validez empírica de las hipótesis de la CAK y la favorece para la formulación de políticas medioambientales. Por el contrario, un 43% de sus estudios no encontraron ninguna relación o una relación muy débil oponiéndose a la CAK para cualquier implicación política.

La literatura teórica o empírica tanto en el campo de la CAK como en el campo de la PHH, realmente es más extensa de lo que alguien pudiera revisar, tomando como motor de búsqueda *Google Scholar* (GS) que encuentra una cantidad de citas significativamente mayor que la *Web of Science* (WoS) y *Scopus* en todas las áreas temáticas (Martín-Martín et al., 2018), al día en que se escribe este trabajo, para las palabras “*environmental kuznets curve*” el buscador arrojó 82 600 resultados, mientras que para las palabras “*pollution haven hypothesis*” los resultados arrojados fueron de 103 000.

En ese sentido, considerando la abundante literatura en curso, esta investigación en la tabla 3 presenta entonces, una muestra de estudios empíricos consultados en relación con la hipótesis CAK y la PHH. Se priorizaron los trabajos con mayores citaciones, escritos en inglés y que en su marco teórico y metodología incluyeran variables que buscaran probar ambos enfoques teóricos. A continuación, se comentan algunos de los trabajos sobresalientes de la revisión de literatura.

En el año 2014, C. He et al., aplicaron el marco tridimensional de densidad, división y distancia propuesto por el Banco Mundial para identificar la heterogeneidad espacial del desarrollo y la contaminación en la China urbana. Detectaron una relación en U invertida entre densidad y emisión industrial de SO<sub>2</sub>, mientras que se halla una relación cúbica entre densidad e intensidad de emisión industrial de SO<sub>2</sub>/hollín. La significación estadística de la división indica que la hipótesis del refugio de la contaminación se mantiene en la región occidental y las ciudades de la periferia. La implicación medioambiental de la distancia es que la contaminación industrial se concentra en gran medida en los núcleos nacionales y regionales.



Tabla 3. Trabajos empíricos sobre la CAK y la PHH

<b>Autor/es</b>	<b>País/Región</b>	<b>Método</b>	<b>Variables utilizadas</b>	<b>Hallazgo principal</b>
<b>Q. Wang et al., (2023)</b>	208 países en el mundo, 1990-2008.	GMM en panel y FMOLS.	CO2, PIB, PIB per cápita, CH, CER, RN y C.	CAK válida.
<b>Mukhtarov et al. (2023)</b>	Azerbaiján, 1993 a 2019.	DOLS.	CER, PIB per cápita, X y M.	
<b>X. Wang et al. (2022)</b>	Industria del hierro y acero China, 1995 a 2017.	VECM.	CO2, INNT y RA.	CAK válida, HP y PJ confirmada.
<b>Mahmood (2023)</b>	18 países de América Latina, 1970 a 2019.	Modelo espacial de Durbin.	CO2, PIB per cápita, IED, X, M y DF.	CAK y PHH válidas.
<b>Leitão et al. (2023)</b>	Países Visegrado, 1990 a 2018.	Datos panel.	CO2, PIB, IED, CE, CER y PU.	CAK y PH válidas.
<b>Jahanger, Zubair Chishti, et al. (2022)</b>	México, 1990 a 2018.	QARDL.	PIB, CER y GL.	CAK válida.
<b>Jahanger, Yu, et al. (2022)</b>	Países del T-MEC, 1990 a 2018.	Datos panel.	CO2, PIB, IED y RN.	CAK válida y PHH rechazada.
<b>Hossain et al. (2022)</b>	México, 1980 a 2018.	ARDL dinámico.	HE, PIB, IED, INNT, RN y CE.	CAK inválida y PHH confirmada.
<b>Balsalobre-Lorente et al. (2022)</b>	BRICS, 1990 a 2014.	Datos panel.	CO2, PIB, IED, CE y UR.	CAK y PHH confirmadas.
<b>Muhammad et al. (2021)</b>	BRICS, 1991 a 2018.	GMM panel .	CO2, PIB, IED, CER y RN.	PHH válida.
<b>Mehraaein et al. (2021)</b>	Malasia, 1971 a 2014.	ARDL.	HE, PIB, CE, IED y DF.	CAK y PHH confirmadas.
<b>Freire-Vinueza et al. (2021)</b>	15 países de América Latina, 1980 a 2015.	MCGF.	CO2, PIB y IED.	CAK válida y PHH válida parcialmente.
<b>X. He et al. (2021)</b>	México, 1990 to 2018.	ARDL, FMOLS y DOLS.	CCO2, GLO, DF, PIB, CE y AC.	

<b>Bulus &amp; Koc (2021)</b>	Corea, 1970 a 2018.	Prueba de límites ARDL.	CO2, PIB, IED, CE, CER, X y M.	CAK en forma de N y PHH moderada.
<b>Bhujabal et al. (2021)</b>	Asia Pacífico, 1990 a 2018.	Panel PMG.	CO2, IED y TIC.	-IED y -TIC.
<b>Balsalobre-Lorente et al. (2021)</b>	5 países de la UE, 1990 a 2015.	FMOLS.	CO2, PIB, IED, TI, INNT y PER.	CAK y PHH válidas.
<b>An et al. (2021)</b>	Países de La Franja y la Ruta, 2003 a 2018.	Datos panel con FEOLS, DOLS y FMOLS.	CO2, PIB, IED, INNT y CP.	CAK parcial y PHH válida.
<b>Ahmad et al. (2021)</b>	Países de la OCDE, 1990 a 2014.	Datos panel.	CO2, PIB, IED, INNT, CER y X.	CAK y PH válidas.
<b>Khattak et al. (2020)</b>	BRICS, 1980 a 2016.	Panel CCEMG.	CO2, PIB, INNT y CER.	CAK confirmada.
<b>Z. Khan et al. (2020)</b>	Países G7, 1990 a 2017.	Datos panel segunda generación.	CO2, PIB, INNT, CER, X y M.	+PIB, -INNT, -CER, -X y +M.
<b>M. A. Khan &amp; Ozturk (2020)</b>	17 países de Asia, 1980 a 2014.	Datos panel FMOLS.	CO2, PIB, IED y AC.	PHH confirmada.
<b>Gómez &amp; Rodríguez (2020)</b>	Países T-MEC, 1980 a 2016.	Datos panel MMQR y FMOLS.	HE, PIB, CER, AC y INNT.	CAK válida.
<b>Essandoh et al. (2020)</b>	52 países, 1991 a 2014.	Datos panel PMG-ARDL.	CO2, IED, y CI.	Resultados mixtos PHH.
<b>Dhrifi et al. (2020)</b>	98 países en desarrollo, 1995 a 2017.	SEM.	PO, CO2 y IED.	U invertida entre IED y CO2.
<b>Ahmad et al. (2020)</b>	24 países de la OCDE, 1993 a 2014.	SEM.	CO2, PIB, IED, INNT, CE	CAK rechazada.
<b>Shahbaz et al., (2019)</b>	Región MENA, 1990 a 2015.	GMM.	CO2, IED, CEB y PIB.	CAK y PHH válidas.

<b>Sarkodie &amp; Strezov (2019b)</b>	China, India, Irán, Indonesia y Sudáfrica	Datos panel, Driscoll-Kraay.	GEI, IED, PIB y CE.	PHH válida y CAK resultados mixtos.
<b>Z. Khan et al. (2019)</b>	China, 1991 a 2015.	ARDL no lineal.	CO2, RA, CE, I+D, PU y DF.	-RA, +CE, -I+D, +PU y -DF.
<b>Hanif et al. (2019)</b>	15 países asiáticos en desarrollo, 1990 a 2013.	ARDL.	CO2, PIB, IED y CE.	PHH y CAK válidas y +CE.
<b>Destek &amp; Okumus (2019)</b>	10 países recién industrializados, 1982 a 2013.	Panel segunda generación.	HE, PIB, IED y CE.	PHH forma de U, +PIB, +CE.
<b>Shahbaz et al. (2018)</b>	Francia, 1955 a 2016.	SOR	CO2, PIB, IED, DF, CE INNT.	PHH confirmada.
<b>Salahuddin et al. (2018)</b>	Kuwait, 1980 a 2013.	Prueba de límites ARDL.	CO2, PIB, IED, CEE y DF.	+PIB, +IED, +CEE.
<b>Rafindadi et al. (2018)</b>	Consejo de Cooperación del Golfo, 1990 a 2014.	Panel PMG.	CO2, IED y CE.	PHH no válida.
<b>Liu et al. (2018)</b>	285 ciudades de China, 2003 a 2014.	Datos panel espacial.	SO2, aguas residuales, y IED.	Resultados mixtos PHH y PH válidas.
<b>Kathuria (2018)</b>	21 estados en India, 2002 a 2010.	Datos panel.	IED y RA.	PHH no validada.
<b>Sun et al. (2017)</b>	China, 1980 a 2012.	ARDL.	CO2, PIB, IED, AC, CE, UR y DF.	PHH válida.
<b>(Solarin et al., 2017)</b>	Ghana, 1980 a 2012.	ARDL.	CO2, PIB, CE, CER, IED, UR, CI y AC.	PHH válida.
<b>Sapkota &amp; Bastola (2017)</b>	14 países de Latinoamérica, 1980 a 2010.	Datos panel.	CO2, IED y PIB.	CAK y PHH válidas.

<b>Özokcu &amp; Özdemir (2017)</b>	26 países OCDE y 52 países emergentes, 1980 a 2010.	Datos panel, errores Driscoll-Kraay.	CO2, PIB y CE.	CAK no válida, relación N invertida.
<b>Ali et al. (2017)</b>	Malasia, 1971 a 2012.	Prueba de límites ARDL.	CO2, PIB, IED, CE, AC y DF.	CAK válida.
<b>Zhang &amp; Zhou (2016)</b>	China nivel regional y nacional, 1995 a 2010.	Modelo STIRPAT.	CO2 y IED.	PH válida.
<b>Al-Mulali et al. (2015)</b>	Vietnam, 1981 a 2011.	ARDL.	CO2, PIB, IED, CE, CER, X y M.	PHH válida y CAK no válida
<b>C. He et al. (2014)</b>	China, periodos entre 2004 a 2010.	Datos panel espacial.	SO2, PIB y IED.	Resultados mixtos regiones, U y N invertidas.
<b>Blanco et al. (2013)</b>	18 países de Latinoamérica, 1980 a 2007.	VAR con causalidad de Granger.	CO2 y IED.	-IED.
<b>Cole et al. (2011)</b>	112 ciudades en China, 2001 a 2004.	Datos panel.	Contaminantes del agua y aire, PIB, IED.	+PIB y +IED.
<b>Waldkirch &amp; Gopinath (2008)</b>	México nivel industrial, 1994 a 2000.	Modelo Tobit.	IED y contaminantes (SO2 y NOx).	PHH confirmada.

Fuente: Elaboración propia.

Al-Mulali et al. (2015) investigaron la existencia de la hipótesis de la curva medioambiental de Kuznets en Vietnam durante el periodo 1981-2011. Establecieron un modelo de contaminación aplicando la metodología ARDL. Los resultados revelaron que la hipótesis del paraíso de la contaminación existe en Vietnam porque el capital aumenta la contaminación. Además, las importaciones también aumentan la contaminación, lo que indica que la mayoría de los productos importados de Vietnam consumen mucha energía y están muy contaminados.

Sin embargo, las exportaciones no tienen ningún efecto sobre la contaminación, lo que indica que el nivel de exportaciones no es lo suficientemente significativo como para afectar a la contaminación. Además, el consumo de energía fósil aumenta la contaminación, mientras que el consumo de energía renovable no tiene un efecto significativo en la reducción de la contaminación. Por otra parte, la mano de obra reduce la contaminación, ya que la mayor parte de la población activa de Vietnam trabaja en los sectores agrícola y de servicios, que consumen menos energía que el sector industrial. Sus resultados obtenidos, sus resultados muestran que la hipótesis CAK no existe porque la relación entre el PIB y la contaminación es positiva tanto a corto como a largo plazo.

Özokcu & Özdemir (2017) investigaron la relación entre la renta y las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en el contexto de la CAK. Para ello, examinaron dos modelos empíricos. Para ambos modelos analizaron la relación entre la renta per cápita y las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita y la relación entre la renta per cápita, el uso de energía per cápita y las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita respectivamente entre 1980 y 2010, utilizando las técnicas de estimación de datos de panel con la aplicación de Errores Estándar de Driscoll-Kraay.

Para el primer modelo, los datos se analizan para 26 países de la OCDE con altos niveles de renta, mientras que para el segundo modelo, los datos se examinan para 52 países emergentes. Los resultados de ambos modelos muestran que se observa una relación en forma de N y una relación en forma de N invertida para la forma funcional cúbica. Así pues, los resultados no apoyan la hipótesis CAK, que implica que la degradación medioambiental no puede resolverse automáticamente mediante el crecimiento económico (Özokcu & Özdemir, 2017).

Sun et al. (2017b) investigaron la validez de la PHH en China utilizando datos anuales de series temporales de 1980-2012. Para lograr este objetivo, utilizó el enfoque de Cointegración Autorregresiva de Lag Distribuido (ARDL) para examinar la hipótesis, y se

incluyen el producto interior bruto (PIB), el cuadrado del PIB, el uso de energía, la entrada de inversión extranjera directa (IED), la libertad económica, la urbanización, el desarrollo financiero, así como la apertura comercial como principales impulsores de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Realizaron también pruebas de raíz unitaria de quiebre estructural e incorporaron una quiebre en su modelo.

Los resultados de la prueba de límites mostraron que existe una relación estable a largo plazo entre las variables elegidas en cada modelo. Las emisiones de CO<sub>2</sub> aumentarán un 0,058% con un aumento del 1% de las entradas de IED (% del PIB), lo que indica que la PHH existe en China.

Kathuria (2018), examinó el papel de la gobernanza medioambiental en la inversión extranjera directa poniendo a prueba la hipótesis del paraíso de la contaminación para 21 estados indios durante el periodo 2002-2010. Para comprobar la hipótesis, su estudio calculó un índice de gasto en reducción ajustado a la composición industrial a nivel estatal utilizando datos a nivel de planta de una Encuesta Anual de Industrias. El índice compara los gastos reales en reducción de la contaminación en un estado concreto, sin ajustar por la composición industrial, con los gastos previstos en reducción en el mismo estado.

Si el índice ajustado es bajo para un estado, implica que el estado tiene una mala gobernanza medioambiental, lo que se esperaría que indujera a las empresas extranjeras a invertir. Sin embargo, los resultados no demuestran la hipótesis del paraíso de la contaminación en el contexto indio. Otras variables relacionadas con las infraestructuras y el acceso al mercado influyen más en las decisiones de inversión de las empresas extranjeras que el rigor medioambiental.

Shahbaz et al. (2018), exploraron los determinantes de las emisiones de carbono en Francia teniendo en cuenta el papel desempeñado por la inversión extranjera directa (IED),

el desarrollo financiero, el crecimiento económico, el consumo de energía y las innovaciones en la investigación energética para influir en la función de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Los autores, emplearon la prueba de raíz unitaria SOR en datos de series temporales francesas durante el período 1955-2016 para examinar el orden de integración en presencia de rupturas estructurales bruscas y suaves en las variables. También aplicaron el enfoque de prueba de límites, desarrollado recientemente por McNown et al. (2018) para investigar la presencia de cointegración, los resultados empíricos subrayan la presencia de cointegración entre las series temporales.

Encontraron que la IED tiene un impacto positivo, mientras que las innovaciones en investigación energética tienen un impacto negativo, en las emisiones de carbono francesas. El desarrollo financiero reduce las emisiones de carbono, mejorando así la calidad medioambiental francesa. La IED degrada el medio ambiente, por lo que apoya la hipótesis del paraíso de la contaminación en Francia. Del mismo modo, el desarrollo financiero sugiere que su estabilidad es una condición necesaria para mejorar la calidad medioambiental, al igual que las innovaciones en investigación energética. Por el contrario, el consumo de energía está positivamente relacionado con las emisiones de carbono. Sin embargo, la relación entre crecimiento económico y emisiones de CO<sub>2</sub> es una U invertida, lo que supone una validación de la curva medioambiental de Kuznets (Shahbaz et al., 2018).

Destek & Okumus (2019), investigaron la validez de la hipótesis del refugio de la contaminación para el periodo comprendido entre 1982 y 2013 en diez países de reciente industrialización. Para ello, examinaron la relación entre la renta real, la inversión extranjera directa, el consumo de energía y la huella ecológica utilizando la metodología de datos de panel de segunda generación para tener en cuenta la dependencia transversal entre los países de reciente industrialización. Los resultados mostraron que el aumento del consumo

de energía y el crecimiento económico provocan un aumento de la huella ecológica. Además, se confirma la relación en forma de U entre la inversión extranjera directa y la huella ecológica en los países de reciente industrialización.

Shahbaz et al. (2019) nuevamente examinaron la asociación entre la inversión extranjera directa (IED) y las emisiones de carbono ahora para la región de Oriente Medio y Norte de África (MENA) en 1990-2015, incluyeron el consumo de energía de biomasa como determinante adicional de las emisiones de carbono. Aplicaron el método generalizado de los momentos (GMM) para validar la existencia de la hipótesis del paraíso de la contaminación, su validación fue una forma de N entre la IED y las emisiones de carbono. El vínculo entre el crecimiento económico y las emisiones de carbono tiene forma de U invertida y de N; es decir, satisface las hipótesis de la curva de Kuznets medioambiental.

El uso de energía de biomasa reduce las emisiones de carbono, y el análisis de causalidad revela que la IED causa las emisiones de CO<sub>2</sub>. Claramente, los resultados confirman la existencia de un efecto de retroalimentación entre el crecimiento económico y las emisiones de carbono. La conexión entre el uso de energía de biomasa y las emisiones de CO<sub>2</sub> también es bidireccional.

Ahmad et al., (2020) propone una nueva perspectiva en la bibliografía sobre economía ambiental y de los recursos al examinar la innovación (medida por el gasto en I+D), la IED (medida por la transferencia de tecnología entre países) y el nexo entre energía, medio ambiente y crecimiento. Utilizando modelos de ecuaciones simultáneas (SEM), formularon tres funciones econométricas para la producción, el consumo de energía y la contaminación ambiental con el PIB per cápita, el consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>e) como variables dependientes para veinticuatro economías de la OCDE durante el período comprendido entre 1993 y 2014, respectivamente.



Sus resultados no apoyaron la hipótesis de la Curva de Kuznets Medioambiental en las economías de la OCDE. Al mismo tiempo, observaron una causalidad bidireccional entre el PIB per cápita y el consumo de energía per cápita, lo que indica que la contaminación aún no ha alcanzado el umbral máximo. Además, los resultados desvelaron que el consumo de combustibles fósiles, la innovación y la IED eran las principales fuentes de CO<sub>2</sub>.

Z. Khan et al. (2020), para explorar los determinantes no identificados de las emisiones de CO<sub>2</sub> en los países del G7 de 1990 a 2017, su estudio utilizó metodologías de cointegración de panel de segunda generación. Los resultados confirman una relación estable a largo plazo entre las emisiones de CO<sub>2</sub>, el comercio, la renta, la innovación medioambiental y el consumo de energías renovables. A largo plazo, las importaciones y la renta aumentan las emisiones de carbono basadas en el consumo, mientras que las exportaciones, la innovación medioambiental y el consumo de energías renovables ayudan a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> basadas en el consumo.

Los resultados también se reafirman mediante los métodos del Grupo Medio Aumentado (AMG) y del Grupo Medio de Efectos Correlacionados Comunes (CCEMG). Basándose en los resultados de la prueba de causalidad de Granger, afirmaron que cualquier política dirigida a las exportaciones, las importaciones, los ingresos y la innovación medioambiental modifica significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub>. Por el contrario, cualquier política de apoyo a la degradación medioambiental no afecta a estas variables. Además, cualquier política dirigida a las fuentes de energía renovables afecta significativamente a las emisiones de CO<sub>2</sub> basadas en el consumo y viceversa

Leitão et al. (2023) estudiaron los efectos de la curva de Kuznets medioambiental y los determinantes del crecimiento económico para los países de Visegrado entre 1990 y 2018. Reflexionaron sobre los efectos de la energía renovable y no renovable, la población urbana, la inversión extranjera directa, el crecimiento económico y las emisiones de dióxido

de carbono. Según sus resultados, las pruebas de raíz unitaria del panel mostraron que las variables objeto de estudio están integradas en las primeras diferencias.

Observaron que el crecimiento económico está positivamente correlacionado con las emisiones contaminantes; sin embargo, la renta per cápita al cuadrado se ve negativamente afectada por las emisiones de dióxido de carbono. El consumo de energía aumenta las emisiones de carbono, y la inversión extranjera directa confirma la hipótesis del halo de contaminación. Por lo tanto, los resultados econométricos mostraron que el consumo de energías renovables fomenta el crecimiento regional. En consecuencia, la población urbana y la inversión extranjera directa se correlacionan positivamente con el crecimiento económico confirmando la PHH.

Mukhtarov et al. (2023) examinó la influencia del consumo de energías renovables, el PIB real per cápita, las exportaciones y las importaciones en las emisiones de CO<sub>2</sub> basadas en el consumo en Azerbaiyán de 1993 a 2019 empleando el método de mínimos cuadrados ordinarios dinámicos (DOLS). Los resultados revelaron que el consumo de energías renovables tiene un impacto negativo en las emisiones de CO<sub>2</sub>, mientras que el PIB real per cápita tiene un efecto positivo.

Según los resultados, un aumento del 1% en el consumo de energías renovables conduce a una disminución del 0,26% en las emisiones de CO<sub>2</sub> basadas en el consumo, mientras que un aumento del 1% en el PIB real per cápita conduce a un aumento del 0,46% en las emisiones de CO<sub>2</sub> basadas en el consumo. Además, las importaciones y las exportaciones muestran efectos positivos y negativos, respectivamente. Numéricamente, un aumento del 1% de las importaciones provoca un aumento del 0,18% de las emisiones de CO<sub>2</sub>, mientras que un aumento del 1% de las exportaciones reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 0,16%.

Esto es coherente con las expectativas y los resultados teóricos descritos en la especificación funcional y la sección de datos. La influencia negativa del consumo de energías renovables, así como el mayor efecto de las importaciones, ponen de relieve la necesidad de aplicar medidas respetuosas con el medio ambiente tanto en los sectores energéticos (en particular, la necesidad de aumentar la proporción de energías renovables en el uso total de energía) como en el comercio internacional.

Q. Wang et al. (2023), investigaron el efecto de la apertura comercial, el capital humano, las energías renovables y la renta de los recursos naturales sobre las emisiones de carbono en el marco de la hipótesis CAK. Desarrollaron pruebas econométricas de segunda generación, el Método Generalizado de los Momentos y el estimador de Mínimos Cuadrados Ordinarios Totalmente Modificados, basándose en el conjunto de datos agregados de 208 países desde 1990 hasta 2018.

Los resultados mostraron que:

(i) la hipótesis CAK se valida cuando se consideran los efectos de la apertura comercial, el capital humano, el consumo de energía renovable y las rentas de los recursos naturales. La relación entre el nivel de renta y las emisiones de carbono muestra una curva en forma de «U invertida» a escala mundial. Además, el PIB real per cápita correspondiente al punto de inflexión de la CAK es de 19 203 dólares.

(ii) El consumo de energías renovables y el capital humano tienen efectos heterogéneos sobre las emisiones de carbono en los puntos de inflexión anterior y posterior a la CAK. Concretamente, el consumo de energías renovables tiene un mejor efecto de reducción de las emisiones para los países antes del punto de inflexión, con efectos de -0.4334 y -0.1598, respectivamente; el capital humano tiene un mejor efecto de reducción de las emisiones

para los países después del punto de inflexión, con efectos de -0.6311 y -0.3398, respectivamente.

(iii) El efecto de mitigación de la apertura comercial sobre las emisiones de carbono sólo es efectivo en los países con un desacoplamiento débil después de los puntos de inflexión, con un efecto de mitigación de -0.0615. Sin embargo, las rentas de los recursos naturales aumentan las emisiones de carbono en la mayoría de los países.

#### 4.2 México y Latinoamérica

En el caso de México, los estudios también son contradictorios, además, sus resultados se han probado a nivel individual y a nivel Latinoamérica.

De manera individual, Waldkirch & Gopinath (2008), vuelven a plantear la cuestión de la existencia de un efecto refugio de la contaminación examinando hasta qué punto la intensidad de la contaminación en la producción ayuda a explicar la IED en México. Su estudio se centró en las intensidades de contaminación, que están directamente relacionadas con las normativas sobre emisiones, en lugar de en los impuestos inobservables sobre la contaminación, y permitieron la sustitución entre capital y contaminación.

Examinaron contaminantes diferentes, encontrando una correlación positiva entre IED y contaminación que es estadística y económicamente significativa en el caso de las emisiones de dióxido de azufre, altamente reguladas. Las industrias para las que la relación estimada entre IED y contaminación es positiva reciben hasta el 30% de la IED total y el 30% de la producción manufacturera. Aunque confirmaron la importancia de la ventaja comparativa de México en los procesos de producción intensivos en mano de obra, sus resultados sugieren que las consideraciones medioambientales también pueden ser importantes para las decisiones de inversión de las empresas.

En estudios más recientes, X. He et al. (2021), exploraron el impacto del desarrollo financiero y la globalización en las emisiones de carbono basadas en el consumo de México, controlando al mismo tiempo el crecimiento, la apertura comercial y el consumo de energía, utilizando el enfoque de ajuste dual. Además, su estudio empleó un enfoque ARDL para captar tanto la asociación a largo plazo como a corto plazo, mientras aplicaron pruebas de causalidad en el dominio de la frecuencia para captar los vínculos causales entre las variables a corto, medio y largo plazo.

Los resultados empíricos de este estudio revelaron que:

- (i) la globalización y el desarrollo financiero mejoran la calidad del medio ambiente;
- (ii) el consumo de energía y el crecimiento económico deterioran la calidad del medio ambiente;
- (iii) la apertura comercial no ejerce un impacto significativo sobre la calidad del medio ambiente.

Los resultados de la prueba de causalidad en el dominio de la frecuencia revelaron que el desarrollo financiero, el consumo de energía y el crecimiento económico pueden predecir las emisiones de carbono basadas en el consumo con frecuencias diferentes, mientras que la apertura comercial y la globalización pueden predecir variaciones significativas en las emisiones de carbono basadas en el consumo a largo y corto plazo. Su estudio sugirió que el gobierno de México debería tener cuidado al formular políticas destinadas a aumentar el crecimiento, ya que podrían ir en detrimento de la calidad del medio ambiente.

Por otro lado Hossain et al. (2022), estudiaron la relación entre la huella ecológica y el agotamiento de los recursos naturales, el crecimiento económico, el consumo de energía, la innovación tecnológica y la inversión extranjera directa en la economía mexicana. Utilizaron un enfoque ARDL dinámico con datos de frecuencia anual de 1980 a 2018. Los

resultados empíricos de la prueba de límites ARDL corroboraron la presencia de una asociación de largo plazo entre las variables estudiadas. Además, el resultado dinámico ARDL no validó la hipótesis de la curva ambiental de Kuznets.

Esto implicó que la economía de México permanece en la etapa de escala, con un margen de expansión económica ligado al deterioro de la calidad ambiental. También, validaron la Hipótesis del Refugio de la Contaminación. Adicionalmente, la renta de los recursos naturales acompañada del uso de la energía y la inversión extranjera directa deterioran la calidad ambiental a corto y largo plazo. Sin embargo, la innovación tecnológica parece emanar como una “panacea” para la degradación medioambiental a largo plazo. Según los autores, sus hallazgos tienen implicaciones políticas de gran alcance para el medio ambiente sostenible de México en medio de un uso prudente de los recursos naturales.

Por el contrario Jahanger, Zubair Chishti, et al. (2022) investigaron los efectos heterogéneos de la energía renovable y la globalización a diferentes niveles de dióxido de carbono, utilizando el modelo ARDL por cuantiles (QARDL) con datos trimestrales para México de 1990 a 2018 con el marco de la CAK. Sus resultados mostraron que las energías renovables mitigan las emisiones de CO<sub>2</sub> independientemente del nivel cuantílico. Sin embargo, se encuentra que la globalización eleva la proporción de emisiones de CO<sub>2</sub> mientras interactúa sólo con los cuantiles más altos de emisiones de CO<sub>2</sub>.

Además, el análisis causal espectral reveló que el PIB y el PIB al cuadrado causan las emisiones de CO<sub>2</sub> sólo a largo plazo. Asimismo, las energías renovables y la globalización causan significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub> a corto, medio y largo plazo, lo que sugiere que cualquier choque político en cualquier serie independiente causará emisiones de carbono. Además, los resultados confirman la existencia de la hipótesis CAK para México.

En la región Latinoamérica, Blanco et al. (2013), utiliza pruebas de causalidad de Granger para estudiar la relación entre la IED sectorial y las emisiones de CO<sub>2</sub>. Utilizando una muestra de 18 países latinoamericanos para el periodo 1980 a 2007, encuentran causalidad entre la IED en industrias intensivas en contaminación (“el sector sucio”) y las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita. Este resultado es robusto al controlar otros factores asociados a las emisiones de CO<sub>2</sub> y al utilizar la relación entre emisiones de CO<sub>2</sub> y PIB. Para otros sectores, no encontramos pruebas sólidas de que la IED cause emisiones de CO<sub>2</sub>.

Sapkota & Bastola (2017), examinan los efectos de la inversión extranjera directa y la renta sobre las emisiones contaminantes utilizando series temporales de datos de 1980 a 2010 para 14 países latinoamericanos. En concreto, se pone a prueba la validez de la hipótesis PHH y la hipótesis de la CAK para esta región. Los resultados de los modelos de panel de efectos fijos y aleatorios que controlan los efectos del capital físico, la energía, el capital humano, la densidad de población y la tasa de desempleo indican la validez tanto de la hipótesis PHH como de la CAK.

La estimación de dos modelos distintos para países de renta alta y baja no alteró los resultados de la hipótesis PHH; sin embargo, los efectos del capital humano sobre las emisiones contaminantes son diferentes en los dos grupos de países. Concluyen que las políticas centradas en atraer industrias limpias y energéticamente eficientes a través de la IED tienen potencial para mejorar la salud medioambiental al tiempo que potencian el crecimiento económico en América Latina.

En estudios recientes de la región, Gómez & Rodríguez (2020) examinaron la curva de Kuznets ambiental para los países miembros del Acuerdo Estados Unidos-México-Canadá (T-MEC), utilizando la huella ecológica como medida de degradación ambiental durante 1980 a 2016. Su investigación aplicó métodos econométricos de datos de panel, como la dependencia de corte transversal, raíz unitaria, pruebas de cointegración y causalidad, y el

nuevo método de regresión cuantil de momentos (MMQR). Sus resultados sugieren que las variables se caracterizan por una dependencia de corte transversal, integradas de orden uno y cointegradas.

El método de mínimos cuadrados ordinarios totalmente modificados (FMOLS) mostró que las energías renovables reducen la degradación del medio ambiente, además, validaron la curva de Kuznets medioambiental. En cambio, las patentes y la apertura comercial no muestran una relación estadísticamente significativa. Estos resultados se confirman con el MMQR, donde la energía renovable reduce la degradación medioambiental en los cuantiles del 4 al 6, mientras que la hipótesis de la curva de Kuznets medioambiental es válida en los cuantiles del 3 al 9.

Las patentes y la apertura comercial por su parte, no mostraron una relación estadísticamente significativa en ningún cuantil. Por lo tanto, el estudio recomienda que es esencial promover las energías renovables, las tecnologías más limpias y las normativas medioambientales para reducir las emisiones contaminantes.

Jahanger, Yu, et al. (2022), aportaron una nueva perspectiva al presentar el papel de los recursos naturales y el uso de energías renovables en el efecto de las emisiones de carbono en el contexto de la CAK para los miembros del Tratado de Libre Comercio de América del Norte considerando el periodo de 1990 a 2018. Su análisis controló la afluencia de la IED para evaluar también la validez de la hipótesis del paraíso de la contaminación. Los resultados revelan la existencia de la hipótesis CAK al verificar una asociación en forma de U invertida entre el crecimiento económico y las emisiones de carbono, sólo a largo plazo.

Por otra parte, la “maldición” de los recursos medioambientales también se pone de manifiesto, ya que un mayor consumo de recursos naturales provoca un aumento de las emisiones de dióxido de carbono tanto a corto como a largo plazo. Además, sólo a largo



plazo, un mayor consumo de energías renovables se asocia a un menor volumen de emisiones de carbono. En el caso de la hipótesis del paraíso de la contaminación no es válida ni a corto ni a largo plazo. Por último, se demuestra que la ratificación del TLCAN fomenta el progreso económico, pero inhibe la sostenibilidad medioambiental de sus miembros a largo plazo.

Por lo tanto, se puede afirmar que los países del TLCAN se están alejando en lugar de volverse ecológicos. Estos resultados son heterogéneos, en términos de magnitud, según los distintos niveles de contaminación ambiental. Por último, el análisis desvela causalidades unidireccionales que se extienden desde el crecimiento económico, el consumo de energías renovables y las entradas de inversión extranjera directa hasta las emisiones de dióxido de carbono, sin la respectiva causalidad de retroalimentación.

Mahmood (2023) menciona que “Las Américas” tienen una mezcla de economías en desarrollo y desarrolladas. Por lo tanto, la hipótesis del paraíso de la contaminación es esperable en los países en desarrollo de América Latina. Utilizando el modelo espacial de Durbin, investigaron los efectos de la IED, las exportaciones y las importaciones sobre las emisiones en 18 países latinoamericanos entre 1970 y 2019, incluyendo el crecimiento económico y el desarrollo del mercado financiero en el modelo.

Sus resultados validaron la curva ambiental de Kuznets, y la región se encuentra en la primera etapa de la CAK. Por lo tanto, el crecimiento económico latinoamericano tiene consecuencias medioambientales. Las exportaciones tienen un impacto positivo en las emisiones de CO<sub>2</sub> de los países de origen y vecinos, contaminando toda la región, lo que valida la PHH. Las importaciones no podrían afectar a las economías domésticas, pero tienen efectos medioambientales positivos en las economías vecinas y en toda la región latinoamericana.

El coeficiente negativo de las importaciones es mayor que el coeficiente positivo de las exportaciones. Por lo tanto, el efecto neto del comercio es ambientalmente agradable en América Latina. Por otra parte, la IED tiene un efecto estadísticamente insignificante y el impacto del desarrollo financiero es positivo en las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Marín-Leyva et al. (2022) estudió la relación existente entre el crecimiento económico, el consumo de energías renovables, el consumo de energías fósiles y las emisiones de dióxido de carbono en APEC durante 1990-2018. Aplicando las pruebas de: dependencia cruzada, heterogeneidad del intercepto y raíz unitaria, estimaron un modelo de Efectos Comunes Correlacionados. Sus resultados mostraron una trayectoria en forma de U invertida entre el desarrollo económico y la contaminación ambiental. Se destaca que se encontró una relación negativa entre CO<sub>2</sub> y consumo de energía renovable y, una relación positiva entre CO<sub>2</sub> y consumo de energía fósil. Una limitación del trabajo es la presentación de resultados del total de las economías APEC y no por cada una de ellas. No obstante, destacan la metodología como propuesta novedosa en este tipo de estudios.

Gómez et al. (2024) analizaron el impacto de la Inversión Extranjera Directa de EUA, el Producto Interno Bruto, la apertura comercial (AC) y el consumo de energías renovables (ER), en las emisiones CO<sub>2</sub> en México durante el período 1990 – 2019. Los principales resultados mostraron variables de orden de integración I(1) y existencia de una relación de equilibrio a largo plazo entre las variables. Demostraron que un aumento en la IED, el PIB y la AC contribuyen al incremento de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Y que un incremento en el consumo de ER ayudará a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Los resultados validan la Hipótesis Paraíso de contaminación debido a que la IED de Estados Unidos contribuyó al incremento de las emisiones de CO<sub>2</sub> generando degradación ambiental.

## Capítulo V. Experimentación econométrica

*Durante el siglo XVII, varios descubrimientos adicionales condujeron finalmente a una aceptación más amplia del heliocentrismo, por ejemplo, utilizando observaciones detalladas de Tycho Brahe, Kepler descubrió que la órbita de Marte era una elipse con el Sol en un foco y su velocidad variaba dependiendo su distancia al Sol. Este descubrimiento se detalló en su libro *Astronomía nova* de 1609 junto con la afirmación de que todos los planetas tenían órbitas elípticas y movimiento no uniforme, afirmando "Y finalmente... el sol mismo... derretirá todo este aparato ptolemaico como si fuera mantequilla" (Linton, 2004, p. 183).*

*En 1610, mejorando el telescopio recién inventado, Galileo descubrió las cuatro grandes lunas de Júpiter, evidencia contundente de que el Sistema Solar contenía cuerpos que no orbitaban alrededor de la Tierra, las fases de Venus (más evidencia observacional no explicada adecuadamente por la teoría ptolemaica) y la rotación del Sol alrededor de un eje fijo (Drake, 1972; Linton, 2004; Sharratt, 1996), como lo indica la aparente variación anual en el movimiento de las manchas solares.*

El objetivo de este capítulo es describir la metodología empleada para la comprobación de las relaciones teóricas establecidas, la cual es de naturaleza econométrica. La econometría se basa en el desarrollo de métodos estadísticos que se utilizan para estimar relaciones económicas, probar teorías económicas y evaluar e implementar políticas públicas y de negocios. Los métodos econométricos tienen importancia en casi todas las ramas de la economía aplicada. Se emplean cuando se desea probar una teoría económica o cuando se piensa en una relación que tiene alguna importancia para decisiones de negocios o para el análisis de políticas (Wooldridge, 2009). ¿Cómo se procede para estructurar un análisis económico empírico?

De manera explícita son Gujarati & Porter (2010) quienes enumeran una serie de ocho lineamientos sobre la metodología tradicional de la econometría:

- a) Planteamiento de la teoría o de la hipótesis
- b) Especificación del modelo matemático de la teoría
- c) Especificación del modelo econométrico o estadístico de la teoría
- d) Obtención de datos
- e) Estimación de los parámetros del modelo econométrico
- f) Pruebas de hipótesis
- g) Pronóstico o predicción
- h) Utilización del modelo para fines de control o de políticas.

Es importante señalar que este trabajo sigue la base de los lineamientos anteriormente citados, sin embargo, complementa sus etapas con los textos de Greene (1997), Stock & Watson (2012), Wooldridge (2009), así como otras referencias encontradas en los apartados metodológicos de la revisión de literatura específica de esta investigación. Por lo tanto, las etapas generales a seguir son:

1. Planteamiento de la teoría o hipótesis.
2. Especificación del modelo.
3. Recopilación de datos.
4. Análisis exploratorio de datos.
5. Elección de la técnica econométrica.
6. Estimación, diagnóstico y evaluación del modelo.
7. Interpretación de resultados.
8. Confirmación de los resultados.

### 5.1 Desarrollo econométrico

En esta sección se desarrollan las etapas anteriores a partir de la naturaleza de esta investigación.

### 5.1.1 Planteamiento teórico, especificación del modelo y obtención de datos.

#### Planteamiento teórico

Según Gujarati & Porter (2010), el planteamiento teórico en un modelo econométrico implica la formulación de hipótesis basadas en teorías económicas relevantes para el fenómeno que se está investigando. Estas teorías proporcionan el marco conceptual para identificar las relaciones entre las variables y establecer suposiciones sobre el comportamiento de las mismas.

Por otro lado, Wooldridge (2009) destaca que el planteamiento teórico también ayuda a especificar el modelo econométrico de manera adecuada, al proporcionar guías sobre qué variables incluir, qué forma funcional utilizar y qué relaciones entre ellas se espera que existan según la teoría económica de fondo. Además, Greene (1997) señala que el planteamiento teórico es crucial para interpretar los resultados del modelo, ya que permite evaluar si las estimaciones empíricas son consistentes con las predicciones teóricas y si las conclusiones derivadas del análisis econométrico son válidas dentro del contexto de la teoría económica.

Este trabajo tiene la finalidad de determinar si la economía mexicana ha alcanzado el pico máximo de sus emisiones de CO<sub>2</sub> y si actualmente se encuentra en una etapa hacia la descarbonización, para ello dentro del marco teórico de la curva ambiental de Kuznets se busca probar la existencia de una trayectoria de forma de U invertida entre las emisiones de CO<sub>2</sub> y el crecimiento económico medido por el PIB per cápita. De existir tal relación, entonces puede indentificarse a que nivel de PIB sucede el pico máximo, que la literatura de la CAK es conocido como punto de inflexión o *turning point*.

Además, dada la necesidad de contar con estudios que arrojen escenarios sobre la trayectoria de las emisiones de CO<sub>2</sub> a largo plazo, se plantea cuantificar el impacto de las

inversiones extranjeras directas, el consumo de energía fósil y el consumo de energía renovable sobre el CO<sub>2</sub>. Estas variables resultan de gran interés e importancia en la dinámica económica actual como se ha revisado y son dados a partir de enfoque teórico de la CAK en complemento con el enfoque teórico de la hipótesis del paraíso de contaminación.

#### Especificación del modelo

Especificar el modelo significa expresar las relaciones teóricas o hipotéticas que se deseen probar en una forma funcional adecuada para su sometimiento a las pruebas econométricas pertinentes. Gujarati & Porter (2010) distinguen dos tipos de especificación del modelo, una económica matemática y otra econométrica, estos autores mencionan que, un modelo es simplemente un conjunto de ecuaciones matemáticas. El modelo puramente matemático es de interés limitado en la econometría, pues supone una relación exacta o determinista, pero, las relaciones entre las variables económicas suelen ser inexactas.

Para dar cabida a relaciones inexactas entre las variables económicas, es necesario que se modifique la función determinista de una ecuación agregando un término de perturbación o de error simbolizado regularmente con la letra griega *épsilon* ( $\epsilon$ ) o bien *mu* ( $\mu$ ), este término es una variable aleatoria (estocástica) con propiedades probabilísticas definidas. El término de perturbación representa todos los factores que afectan a la variable dependiente pero que no se consideran en el modelo en forma explícita.

Greene (1997) señala que la introducción de un error aleatorio en un modelo determinista no pretende solamente recoger sus ineficiencias, es esencial para asegurarse de que la supuesta aleatoriedad de un factor no explicado, es realmente inexplicable, si no lo es, el modelo resultaría inadecuado, o en otras palabras mal especificado.

En la ecuación 1, se describe el modelo matemático general que se utiliza para examinar las relaciones entre las emisiones de dióxido de carbono, el crecimiento económico, además, se incluye la inversión extranjera directa, el consumo de energía y el consumo de energía renovable como variables de intereses dados los objetivos perseguidos.

Ecuación 1. Especificación matemática del modelo

$$CO2 = f(PIB, PIB^2, IED, CE, CER)$$

A partir del modelo matemático anterior, se transforman las variables en logaritmos naturales y la especificación del modelo empírico que se experimentará se expresa de la siguiente manera:

Ecuación 2. Especificación econométrica de modelo

$$\ln CO2 = \beta_0 + \beta_1 \ln PIB + \beta_2 \ln PIB^2 + \beta_3 \ln IED + \beta_4 \ln CE + \beta_5 \ln CER + \varepsilon$$

Donde:

- $\ln$  expresa la transformación a logaritmos naturales de las variables.
- $CO2$  representa la degradación por cambio climático medida por las emisiones de  $CO2$  per cápita.
- $PIB$  representa el crecimiento económico medido por el PIB per cápita.
- $PIB^2$  representa el crecimiento económico medido por el PIB per cápita al cuadrado.
- $IED$  es la inversión extranjera directa medida en dólares per cápita.
- $CE$  es el consumo de energía primaria de origen fósil medido en kilovatios hora.
- $CER$  es el consumo de energía renovable medido en kilovatios hora.
- $\beta_0$  es el término constante de la regresión.
- $\beta_1$  a  $\beta_5$  son los coeficientes estimados de la regresión.
- $\varepsilon$  es el término de error estándar.

Para probar la hipótesis CAK, deben comprobarse los signos y la significación de los coeficientes en los términos lineal y cuadrático del PIB. Por ejemplo, para obtener una relación en forma de U inversa entre la contaminación ambiental y la renta per cápita, los valores estimados de los coeficientes deberían ser  $\beta_1 > 0$  y  $\beta_2 < 0$ .

En el caso de la variable IED, el resultado del signo puede surgir distintos significados, por ejemplo, un signo negativo del coeficiente implicaría la existencia de hipótesis del halo de contaminación, mientras que un signo positivo implica la existencia del paraíso de contaminación.

#### Obtención de datos

El éxito de todo análisis econométrico depende a final de cuentas de la disponibilidad de los datos recopilados (Gujarati & Porter, 2010). En econometría, los datos provienen de dos fuentes: experimentos y observaciones del mundo no experimentales. En la economía, la mayoría de los datos económicos se obtienen mediante observaciones del comportamiento del mundo real. Los datos obtenidos mediante la observación del comportamiento real fuera de un marco experimental se denominan datos observacionales.

Tanto si los datos son datos experimentales como si son observacionales, las bases de datos son de tres tipos principales: datos de sección cruzada, datos de series temporales y datos de panel (Stock & Watson, 2012). En este contexto, se utilizan series de tiempo para probar las relaciones especificadas en el modelo anterior.

#### Datos de series de tiempo

Una base de datos de series de tiempo consiste en las observaciones de una o más variables a lo largo del tiempo. Debido a que los eventos pasados pueden influir sobre los eventos futuros y los comportamientos rezagados son frecuentes en las ciencias sociales, el tiempo es una dimensión importante en las bases de datos de series de tiempo.



Aunque la mayor parte de los procedimientos econométricos pueden usarse tanto con datos de corte transversal como con datos de series de tiempo, la especificación de modelos econométricos para datos de series de tiempo requiere un poco más de trabajo para que se justifique el uso de los métodos econométricos estándar. Además, se han desarrollado modificaciones y “embellecimientos” de las técnicas econométricas estándar para tomar en cuenta y aprovechar el carácter dependiente de las series de tiempo (Wooldridge, 2009). En la tabla 4 se presenta el resumen del conjunto de datos utilizados en el análisis econométrico.

Tabla 4. Descripción de datos y fuente

<b>Variable</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Indicador</b>	<b>Origen de los datos</b>
<b>Emisiones de dióxido de carbono</b>	CO2	Toneladas de CO2 per cápita	Instituto de Energía (EI)
<b>Crecimiento económico</b>	PIB PIB <sup>2</sup>	Dólares de PIB per cápita (precios constantes de 2010)	Banco Mundial (BM)
<b>Inversión extranjera directa</b>	IED	Dólares de IED per cápita (precios constantes de 2010)	Banco Mundial (BM)
<b>Consumo de energía fósil</b>	CE	Kilovatios hora per cápita de energía primaria consumida de combustibles fósiles.	Our World in Data (OWiD)
<b>Consumo de energía renovable</b>	CER	Kilovatios hora per cápita de energía primaria consumida de fuentes renovables.	Our World in Data (OWiD)

Fuente: Elaboración propia.

Todas las series se incluyen para el periodo de 1970 a 2022 dada la disponibilidad de los datos en conjunto.

### 5.1.2 Modelado de series temporales

Debido a la naturaleza de los datos y las hipótesis formuladas, a continuación, se presentan algunos conceptos esenciales para el seguimiento de la experimentación econométrica del trabajo, estos conceptos son:

- a) Proceso estocástico
- b) Estacionariedad y formas de estacionariedad
- c) Raíz unitaria y diferenciación
- d) Cointegración

#### a) Proceso estocástico

En el análisis de regresión, lo que nos interesa es la dependencia estadística entre variables, y no la dependencia funcional o determinista de la física clásica. Las relaciones estadísticas entre variables son esencialmente variables aleatorias o estocásticas, es decir, variables con distribuciones de probabilidad. La dependencia funcional o determinista, en cambio, también implica variables, pero no son aleatorias ni estocásticas (Gujarati & Porter, 2010, p. 19).

En este sentido, se pueden observar dos tipos de tendencia en los datos de series temporales: tendencias deterministas y tendencias estocásticas. Una tendencia determinista es una función no aleatoria del tiempo. Por el contrario, una tendencia estocástica es aleatoria y varía con el tiempo (Stock & Watson, 2012, p. 395).

Según Stock & Watson (2012), es más apropiado modelizar las series temporales económicas de modo que presenten tendencias estocásticas en lugar de tendencias deterministas. Esto se debe a que es difícil conciliar la previsibilidad que implica una

tendencia determinista con las complicaciones y «sorpresas» a las que se enfrentan los trabajadores, las empresas y los gobiernos año tras año, ya que estos movimientos también son consecuencia de fuerzas económicas complejas; como estas fuerzas cambian de forma impredecible, se interpreta que estas tendencias tienen un componente altamente impredecible, o aleatorio.

En consecuencia, el análisis econométrico se centra en la modelización de series temporales de naturaleza estocástica y no determinista (Gujarati & Porter, 2010; Stock & Watson, 2012; Wooldridge, 2009).

#### b) Estacionariedad y formas de estacionariedad

##### Estacionariedad

En términos generales, una serie temporal es estacionaria si sus características, por ejemplo la media, la varianza y la covarianza, son invariantes en el tiempo, es decir, no cambian con respecto al tiempo. Si no es así, estamos ante una serie temporal no estacionaria (Gujarati & Porter, 2010, p. 418).

##### Procesos estocásticos estacionarios

En términos generales, se dice que un proceso estocástico es estacionario si su media y su varianza son constantes a lo largo del tiempo y si el valor de la covarianza entre dos periodos depende únicamente de la distancia o desfase entre estos dos periodos, y no del momento en que se calculó la covarianza. En la literatura sobre series temporales, un proceso estocástico de este tipo se denomina proceso estocástico débilmente estacionario, estacionario de covarianza, estacionario de segundo orden o amplio (Gujarati & Porter, 2010, p. 740).

En concreto, si una serie temporal es estacionaria, su media, varianza y autocovarianza siguen siendo las mismas independientemente de cuándo se midan; en otras palabras, son invariantes en el tiempo. Una serie temporal de este tipo tenderá a volver a su media (lo que se conoce como reversión a la media) y las fluctuaciones en torno a esta media (medidas por su varianza) tendrán una amplitud aproximadamente constante (Cuthbertson et al., 1992). En otras palabras, las observaciones de un proceso estacionario no se desvían excesivamente de su valor medio debido a una varianza finita.

Si una serie temporal no es estacionaria en el sentido definido anteriormente, se denomina serie temporal no estacionaria. En otras palabras, una serie temporal no estacionaria tendrá una media variable en el tiempo o una varianza variable en el tiempo, o ambas. ¿Por qué son tan importantes las series temporales estacionarias? Porque si una serie temporal es no estacionaria, sólo podemos estudiar su comportamiento durante el periodo en cuestión. En consecuencia, cada conjunto de datos de la serie temporal corresponderá a un episodio concreto. Por tanto, no es posible generalizar a otros periodos.

También conviene mencionar un tipo particular de proceso estocástico (o serie temporal): el proceso puramente aleatorio o de ruido blanco. Se dice que un proceso es puramente aleatorio si tiene una media igual a cero, una varianza constante y no está correlacionado serialmente (sin autocorrelación).

#### Procesos estocásticos no estacionarios

Aunque se hace hincapié en las series temporales estacionarias, a menudo se encuentran series temporales no estacionarias, siendo el ejemplo clásico el modelo de paseo aleatorio. Existen dos tipos de paseo aleatorio:

1) Paseos aleatorios sin deriva (es decir, sin término constante ni intercepto). La media de una variable « Y » es igual a su valor inicial (constante), pero a medida que t aumenta, su

varianza aumenta indefinidamente, lo que viola una condición de estacionariedad. En resumen, un modelo de paseo aleatorio sin deriva es un proceso estocástico no estacionario.

2) Paseo aleatorio con deriva o con deriva (es decir, con un término constante). En un modelo de paseo aleatorio con deriva, la media, así como la varianza, aumentan con el tiempo, violando de nuevo las condiciones de estacionariedad (débil). Por tanto, el modelo, con o sin deriva, es un proceso estocástico no estacionario.

### c) Raíz unitaria y diferenciación

#### Raíz unitaria

Un proceso de raíz unitaria describe una serie temporal cuya característica principal es que no vuelve a un nivel estable después de un choque o perturbación. En otras palabras, es una serie que no tiende a converger hacia su valor medio ni se estabiliza en torno a una tendencia a largo plazo.

En términos técnicos, un proceso de raíz unitaria se caracteriza por la presencia de una raíz unitaria, es decir, un valor de 1, en su polinomio característico, lo que implica que no puede estabilizarse y tiende a ser no estacionario. En consecuencia, los términos no estacionariedad, paseo aleatorio, raíz unitaria y tendencia estocástica se consideran sinónimos (Gujarati & Porter, 2010, p. 744).

#### Diferenciación

Si una serie temporal (no estacionaria) tiene que diferenciarse  $d$  veces para convertirse en estacionaria, se dice que la serie es integrada de orden  $d$ . Una serie temporal integrada de orden  $d$  se denomina  $I(d)$ . Si una serie temporal es estacionaria desde el principio (es decir, no requiere diferenciación), se dice que es integrada de orden cero y se denota por

I(0). Por consiguiente, los términos «serie temporal estacionaria» y «serie temporal integrada de orden cero» significan lo mismo. La mayoría de las series temporales económicas son I(1), lo que significa que, por lo general, sólo se vuelven estacionarias después de haber tomado sus primeras diferencias.

De manera técnica la diferencia de primer orden se calcula como:

Ecuación 3. Diferencia de una serie de tiempo

$$\Delta y_t = y_t - y_{t-1}$$

Dónde,  $y_t$  es el valor de la variable en el tiempo  $t$  y  $y_{t-1}$  es valor de la variable en el tiempo anterior, representado como  $t - 1$ .

El modelo de caminata aleatoria no es más que un caso específico de una clase más general de procesos estocásticos conocidos como procesos integrados. Recuerde que un proceso sin deriva es no estacionario, pero su serie de primeras diferencias, es estacionaria. Por tanto, un proceso sin deriva se llama proceso integrado de orden 1 y se denota como I(1). De manera similar, si una serie de tiempo tiene que diferenciarse dos veces (es decir, se toman primeras diferencias de la serie de primeras diferencias) para hacerla estacionaria, esa serie de tiempo se denomina integrada de orden 2.

Cointegración

La regresión de una serie de tiempo no estacionaria sobre otra no estacionaria puede causar una regresión espuria. Si se somete estas series de manera individual a un análisis de raíz unitaria se encontrará que ambas son I(1); es decir, contienen una tendencia estocástica. Es muy posible que las dos series compartan la misma tendencia común, por lo que la regresión de una sobre la otra no será necesariamente *espuria* (en términos simples, falsa).

En términos económicos, dos variables serán cointegradas si existe una relación de largo plazo, o de equilibrio, entre ambas. La teoría económica a menudo se expresa en términos de equilibrio. En tanto se verifique que los residuos de las regresiones como son  $I(0)$  o estacionarios, la metodología tradicional de regresión es aplicable a las series de tiempo (no estacionarias). La contribución valiosa de los conceptos de raíz unitaria, cointegración, etc., es que obligan a determinar si los residuos de la regresión son estacionarios. Como observa Granger: “Una prueba para la cointegración puede considerarse como una preprueba para evitar las situaciones de regresiones espurias” (Granger, 1986, p. 226).

### 5.1.3 Análisis exploratorio de los datos

El análisis exploratorio de variables consiste en examinar y comprender las características y comportamientos de las variables que se utilizarán en el modelo, especialmente el análisis gráfico sirve para intuir que tipo de proceso estocástico presentan las variables de estudio, además de que se puede buscar comprender tempranamente las variables muestran un comportamiento esperado u opuesto a las predicciones teóricas. Por lo tanto, los elementos utilizados en esta fase son:

- Gráficos de líneas de las variables durante el periodo.
- Estadística descriptiva de las variables: media, mediana, desviación estándar, valor máximo, valor mínimo y matriz de correlación.

### 5.1.4 El enfoque ARDL con prueba de límites

Particularmente, la hipotética relación en U invertida entre el crecimiento económico y el medio ambiente se ha teorizado como una relación que tiene ocurrencia en periodos de largo plazo. En el modelado de series temporales de relaciones de largo plazo hasta la fecha se han empleado varias técnicas univariantes y multivariantes, como el enfoque basado en los residuos de Granger (1986), el método de máxima verosimilitud con

información completa de Johansen & Juselius (1990) y los procedimientos de MCO totalmente modificados de Phillips & Hansen (1990) entre otros procedimientos para probar este tipo de relaciones. Sin embargo, una condición común a estos procedimientos es que, en efecto, todas las series analizadas deberían ser integradas de orden 1.

En el año 2001 los investigadores Hashem Pesaran, Yongcheol Shin y Richard Smith publicaron el trabajo titulado “*Bounds Testing Approaches to the Analysis of Level Relationships*” que al español se traduciría como “Enfoques de prueba de límites para el análisis de relaciones de nivel”. Trabajo, que a la fecha en que se escribe esta tesis cuenta con 25 048 citas en google escolar, los autores proponen un nuevo enfoque para comprobar la existencia de una relación entre variables en niveles (cointegración) que es aplicable independientemente de si los regresores subyacentes son puramente  $I(0)$ , puramente  $I(1)$  o mutuamente cointegrados.

El estadístico que subyace a este procedimiento es el estadístico de Wald o F en una regresión generalizada. Aquí los autores proporcionaron dos conjuntos de valores críticos asintóticos para los casos “polares” que suponen que todos los regresores son, puramente  $I(1)$  y puramente  $I(0)$ . Dado que estos dos conjuntos de valores críticos proporcionan “límites” de valores para todas las clasificaciones de los regresores en puramente  $I(1)$ , puramente  $I(0)$  o mutuamente cointegrados, proponen el procedimiento de “prueba de límites” (Pesaran et al., 2001).

Si el estadístico de Wald o F calculado queda fuera de los límites del valor crítico, puede extraerse una inferencia concluyente sin necesidad de conocer el estado de integración/cointegración de los regresores subyacentes. Sin embargo, si el estadístico de Wald o F cae dentro de estos límites, la inferencia no es concluyente y es necesario conocer el orden de integración de las variables subyacentes antes de poder hacer inferencias concluyentes (Pesaran et al., 2001).



Siguiendo al a Pesaran et al. (2001), el primer el paso sería la construcción de un modelo de corrección de errores no restringido (UECM por sus siglas en inglés). Sin embargo, en la práctica de las pruebas de límites se ha hecho común verificar inicialmente el orden de integración de las variables mediante pruebas de raíz unitaria que descarten sobre todo la presencia de variables integradas de orden 2, ya que si se modelara en presencia de variables  $I(2)$  (una condición no especificada por esta metodología) se podrían obtener resultados espurios.

Ahora bien, el método de prueba de límites ARDL, basado en la técnica del modelo de corrección de errores no restringido, consta de dos etapas. La primera consiste en estimar el modelo ARDL de interés por mínimos cuadrados ordinarios, para comprobar la existencia de una relación a largo plazo entre las variables pertinentes. Para ello, se construye el UECM y, a continuación, se comprueba si los niveles retardados de las variables de la ecuación son estadísticamente significativos o no. En otras palabras, si se rechaza o se acepta la hipótesis nula de ausencia de relación a largo plazo.

Una vez establecida la relación a largo plazo o cointegración, se inicia la segunda fase de la metodología. Se trata de estimar los coeficientes a largo plazo y, a continuación, estimar el modelo de corrección de errores asociado, con el fin de calcular los coeficientes de ajuste del término de corrección de errores. Los efectos a corto plazo, por tanto, serían capturados por los coeficientes de las variables de primera diferenciación en el modelo UECM (E. L. Owusu & Odhiambo, 2014).

Adicionalmente, E. L. Owusu & Odhiambo (2014) señalan que la existencia de una relación a largo plazo derivada del modelo no implica necesariamente que los coeficientes estimados sean robustos. Esto sugiere que es necesario realizar una serie de pruebas de diagnóstico sobre el modelo establecido; y esto significa la comprobación de los residuos

(es decir, homocedasticidad, correlación no serial, etc.), así como pruebas de estabilidad para garantizar que el modelo estimado es estadísticamente robusto.

#### 4.1.4.1 Pruebas de raíz unitaria ADF, PP y LS

Por lo tanto, de acuerdo con los requerimientos de cointegración del enfoque ARDL de límites, el primer paso es conocer el orden de integración de cada una de las variables modeladas y de este modo conocer si el enfoque ARDL de límites es el adecuado para su modelado, para esta tarea se utilizan las pruebas de raíz unitaria de Dickey-Fuller Aumentada (ADF), la prueba Phillips Perron (PP) y la prueba para detectar hasta dos cambios estructurales en las variables de Lee y Strazicich (LS).

Si las variables son de orden de integración  $I(0)$  o  $I(1)$  y no se detecta la presencia de variables  $I(2)$ , el segundo paso de la prueba de límites ARDL es construir el modelo de corrección de errores no restringido, el cual para este trabajo está representado por la ecuación 4.

Ecuación 4. Especificación del modelo UECM

$$\begin{aligned} \Delta \ln CO2 = & \beta_0 + \sum_i^p \beta_1 \Delta \ln CO2_{t-i} + \sum_i^p \beta_2 \Delta \ln PIB_{t-i} + \sum_i^p \beta_3 \Delta \ln PIB_{t-i}^2 + \sum_i^p \beta_4 \Delta \ln IED_{t-i} \\ & + \sum_i^p \beta_5 \Delta \ln CE_{t-i} + \sum_i^p \beta_6 \Delta \ln CER_{t-i} + \gamma_1 \ln CO2_{t-1} + \gamma_2 \ln PIB_{t-1} \\ & + \gamma_3 \ln PIB_{t-1}^2 + \gamma_4 \ln IED_{t-1} + \gamma_5 \ln CE_{t-1} + \gamma_6 \ln CER_{t-1} + \varepsilon_t \end{aligned}$$

En la ecuación 4,  $\Delta$  denota el operador de diferencia,  $\beta_0$  denota el término constante, los coeficientes  $\beta_1$  a  $\beta_6$  denotan la dinámica de corrección de error a corto plazo, mientras que los coeficiente  $\gamma_1$  a  $\gamma_6$  corresponden a la relación a largo plazo, por último  $\varepsilon_t$  es término de error. Las longitudes de rezago óptimas ( $i$  y  $p$ ) se determinan mediante la selección del criterio de información Akaike (AIC).

El tercer paso continua con la prueba de límites para la existencia de una relación de cointegración entre las variables del sistema. El estadístico *F-test* se utiliza para determinar si las variables están cointegradas probando la significación conjunta de los coeficientes de nivel retardado. Por ejemplo, en la Ec. (4), en la que CO<sub>2</sub> es la variable dependiente, la hipótesis nula de ausencia de relación de cointegración, se contrasta con la hipótesis alternativa de una relación cointegrante. Es decir, en presencia de cointegración, se debe aceptar la hipótesis nula.

El estadístico F, obtenido al realizar la prueba de límites, tiene una distribución no estándar cuyos límites de valor crítico asintótico son proporcionados por Pesaran et al. (2001). Sin embargo, recientemente Narayan (2005) argumentaron que los límites críticos proporcionados por Pesaran et al. (2001) son inadecuados en muestras de tamaño pequeño y regeneraron nuevos conjuntos de valores críticos para muestras pequeñas que oscilan entre 30 y 80 observaciones para los niveles habituales de significación.

Dado el periodo seleccionado en forma anual de las series, que va de 1970 a 2022, resulta un tamaño de muestra de 53 observaciones en este estudio, por lo tanto, también se compara el valor del estadístico F calculado con los valores críticos del estadístico F proporcionados en Narayan (2005).

De este modo la prueba de hipótesis es como sigue. Si el estadístico F calculado se encuentra por encima del límite superior de los valores críticos, se rechaza la hipótesis nula de no cointegración y se acepta la hipótesis alternativa de cointegración, si se encuentra por debajo del límite inferior, no se puede rechazar la hipótesis nula de no cointegración, y si se sitúa entre los límites inferior y superior, el resultado no es concluyente.

Si comprueba la presencia de cointegración entre las variables entonces el tercer y cuarto paso es estimar los coeficientes de largo y corto plazo a partir del UECM especificado en la

ecuación 4. Se estiman los modelos a largo y corto plazo basándonos en las longitudes de retardo óptimas seleccionadas. Una vez determinada y confirmada la relación a largo plazo, el ECM estimado para los parámetros de corto plazo se expresa del siguiente modo:

Ecuación 5. Especificación del modelo ECM

$$\Delta \ln CO2 = \beta_0 + \sum_i^p \beta_1 \Delta \ln CO2_{t-i} + \sum_i^p \beta_2 \Delta \ln PIB_{t-i} + \sum_i^p \beta_3 \Delta \ln PIB_{t-i}^2 + \sum_i^p \beta_4 \Delta \ln IED_{t-i} + \sum_i^p \beta_5 \Delta \ln CE_{t-i} + \sum_i^p \beta_6 \Delta \ln CER_{t-i} + \delta TCE_{t-1} + \varepsilon_t$$

donde,  $\delta$  es el parámetro de velocidad de ajuste, y  $TCE_{t-1}$  es el término de corrección del error retardado un período. Todas las demás variables son las definidas anteriormente. El coeficiente del término de corrección del error indica la velocidad de ajuste al equilibrio tras una perturbación del modelo y debe tener un signo negativo estadísticamente significativo.

Para garantizar la bondad del ajuste del modelo, realizamos pruebas de diagnóstico de normalidad, correlación serial, Heterocedasticidad y especificación. Finalmente, del mismo modo que Pesaran et al. (2001, p. 314), se comprueba la estabilidad de los coeficientes a lo largo del tiempo utilizando los gráficos de suma acumulada (CUSUM) y suma acumulada de cuadrados (CUSUMSQ) de residuos recursivos desarrolladas por Brown et al. (1975).

#### 5.1.5 Evaluación y diagnóstico del modelo

Además de los estadísticos propios del modelo ARDL de prueba de límites, se evalúa el modelo general a través de los siguientes estadísticos.

#### R<sup>2</sup> y R<sup>2</sup> ajustado

El coeficiente de determinación, comúnmente simbolizado como R<sup>2</sup> es una medida utilizada para evaluar la bondad de ajuste de un modelo de regresión. Indica la proporción de las

variaciones de la variable dependiente que es explicada por las variables independientes en el modelo de regresión. El  $R^2$  se ubica entre 0 y 1 (o bien 0 a 100%), un coeficiente cercano a 1 indica que una gran proporción de la variabilidad de la variable dependiente está siendo explicada por el modelo de regresión, mientras que un coeficiente cercano a 0 indica una mínima capacidad explicativa de los regresores.

Sin embargo, el  $R^2$  tiene una limitación, y es que aumenta su valor siempre que se añaden más variables al modelo, incluso si esas variables no son significativas. Para abordar esta limitación, el econométrista holandés Henri Theil, desarrolló el  $R^2$  ajustado, el cual tiene en cuenta el número de variables explicativas en el modelo al penalizar (disminuir) el valor del  $R^2$  por el número de variables que se incluyen en el modelo y que no son explicativas del mismo (Theil, 1992).

#### Normalidad Jarque-Bera

La prueba de Jarque-Bera (JB) es un estadístico para evaluar si los residuos de un modelo de regresión siguen una distribución normal, fue desarrollada por el economista mexicano Carlos Jarque Uribe y el econométrista indo-estadounidense Anil K. Bera en el artículo "*Efficient tests for normality, homoscedasticity and serial independence of regression residuals*". Esta prueba es particularmente útil porque muchos modelos de regresión, como el modelo lineal clásico, asumen que los residuos tienen una distribución normal, lo que es crucial para la validez de las inferencias estadísticas realizadas con esos modelos.

Bajo la hipótesis nula de normalidad de los residuos si el p-valor del estadístico es mayor que el valor crítico de la distribución chi-cuadrado (regularmente .05), entonces no se puede rechazar la hipótesis nula y se concluye que los residuos siguen una distribución normal. Por otro lado, si el p-valor es significativamente menor que el valor crítico, se puede

rechazar la hipótesis nula y se asume que los residuos no siguen una distribución normal (Jarque & Bera, 1980).

#### Correlación serial LM test

La prueba Breusch-Godfrey es una prueba estadística utilizada para detectar la presencia de autocorrelación en los residuos de un modelo de regresión. Es una extensión de la prueba LM (Lagrange Multiplier) de autocorrelación y se utiliza específicamente para detectar la autocorrelación de orden superior en los residuos, es decir, la autocorrelación de los términos de error más allá del primer rezago (Breusch, 1978).

La estadística de prueba Breusch-Godfrey se calcula como la estadística LM en el modelo ampliado. Bajo la hipótesis nula de ausencia de autocorrelación, esta estadística sigue aproximadamente una distribución chi-cuadrado con un número de grados de libertad igual al número de rezagos incluidos en el modelo ampliado (Godfrey, 1978a).

Si la prueba indica la presencia de autocorrelación, puede ser necesario tomar medidas correctivas, como la inclusión de términos de rezago adicionales en el modelo o el uso de estimadores robustos que sean menos sensibles a la autocorrelación.

#### Heterocedasticidad

La prueba de heteroscedasticidad de Breusch-Pagan-Godfrey (BPG) es una prueba estadística utilizada para evaluar si existe heteroscedasticidad en un modelo de regresión. La heteroscedasticidad se refiere a la situación en la que la varianza de los errores de un modelo de regresión no es constante a lo largo de los valores de las variables explicativas.

La prueba de Breusch-Pagan-Godfrey se basa en la idea de que si hay heteroscedasticidad en un modelo, entonces la varianza de los errores está relacionada con una o más de las variables explicativas. La prueba consiste en regresar los residuos al cuadrado de un

modelo de regresión en una nueva regresión auxiliar contra las variables explicativas originales. Si las variables explicativas están relacionadas con la varianza de los errores, entonces se espera que exista una relación significativa en la regresión auxiliar (Breusch & Pagan, 1979).

La hipótesis nula de la prueba es que no hay heteroscedasticidad en el modelo (es decir, la varianza de los errores es constante). Si el valor p asociado con la prueba es menor que un nivel de significancia predefinido, se rechaza la hipótesis nula en favor de la hipótesis alternativa de que hay heteroscedasticidad en el modelo (Godfrey, 1978b)

#### Especificación RAMSEY

La prueba Ramsey RESET (Regresión Error Specification Test) es una herramienta utilizada en econometría para evaluar si el modelo de regresión lineal que se está utilizando captura adecuadamente la relación entre las variables explicativas y la variable dependiente. La prueba se utiliza principalmente para detectar la presencia de errores de especificación funcional, es decir, si hay alguna no linealidad que no se está capturando en el modelo.

La prueba Ramsey RESET se basa en la idea de que si hay una no linealidad no capturada en el modelo, entonces al elevar al cuadrado o al cubo la variable explicativa o combinaciones de estas, se podrían obtener predictores adicionales significativos. Por lo tanto, en la prueba RESET, se ajusta el modelo original añadiendo términos al cuadrado o al cubo de las variables independientes y luego se evalúa si estos términos adicionales son significativos en la explicación de la variable dependiente.

La interpretación de la prueba Ramsey RESET es la siguiente:

Si los términos adicionales (al cuadrado o al cubo de las variables independientes) resultan ser estadísticamente significativos, entonces hay evidencia de que el modelo original podría

estar mal especificado, es decir, podría haber una no linealidad no capturada. Si los términos adicionales no son estadísticamente significativos, entonces no hay evidencia de que el modelo original esté mal especificado en términos de no linealidad.

La hipótesis nula en la prueba Ramsey RESET es que el modelo de regresión lineal especificado es correcto y captura adecuadamente la relación entre las variables independientes y la variable dependiente, es decir, no hay errores de especificación funcional. En otras palabras, la hipótesis nula afirma que no hay términos adicionales no lineales que deberían ser incluidos en el modelo para mejorar su capacidad predictiva.

Por lo tanto, si la prueba Ramsey RESET no rechaza la hipótesis nula, esto sugiere que el modelo especificado es adecuado y no hay evidencia suficiente para concluir que hay problemas de especificación funcional. Sin embargo, si la prueba rechaza la hipótesis nula, indica que existe evidencia estadística de que el modelo podría estar mal especificado y que podría ser necesario considerar la inclusión de términos adicionales no lineales para mejorar la capacidad del modelo para explicar los datos (Ramsey, 1969).

#### 5.1.6 Interpretación de los resultados

La interpretación de resultados se detalla en el siguiente capítulo, a partir de los siguientes elementos:

- Gráficos de series temporales de las variables seleccionadas.
- Estadística descriptiva: Media, mediana, desviación estándar, valor mínimo, valor máximo para cada variable del estudio, así como la matriz de correlación.
- Tablas de raíz unitaria ADF, PP y LS.
- Tabla del modelo UECM y con este las pruebas de diagnóstico especificadas JB, LM, BPG y Ramsey RESET. En esta misma tabla se evalúa la bondad de ajuste del modelo por medio del  $R^2$  y  $R^2$  cuadrado ajustado.



- Tabla de prueba de límites para determinar relación de largo plazo de las variables de estudio, es decir, la cointegración del modelo.
- Tabla de coeficientes de largo plazo a partir de la cual se acepta o se rechaza la hipótesis CAK, la PHH, así como el impacto del consumo de energía y consumo de energía renovable sobre las emisiones de CO<sub>2</sub>.
- Tabla de coeficientes de corto plazo por medio del ECM.
- Gráficos CUSUM y CUSUM al cuadrado.
- Tabla del modelo MCO para confirmación de los resultados.

#### 5.1.7 Confirmación de resultados

Cada vez son más los trabajos de la literatura empírica que son estrictos en la confirmación de sus resultados, con ese objetivo, diversos trabajos han utilizado una segunda técnica econométrica que confirme al menos los signos obtenidos de los coeficientes estimados y verificar de este modo que los resultados obtenidos se siguen comprobando. Por esta razón, este trabajo emplea el modelo clásico de mínimos cuadrados ordinario (MCO) para verificación de los resultados obtenidos.

Al ser el modelo MCO básico de la experimentación econométrica y al considerarse complementario al modelo principal ARDL de límites, no se profundiza la descripción para este trabajo, sin embargo, para su estimación se siguen todas las pruebas de diagnóstico de los modelos de regresión. Además, el MCO puede ayudarnos a comprender también algunos elementos clave de la forma empírica propuesta por la hipótesis de la curva ambiental de Kuznets abordados en la sección de discusión.

Por otro lado, como se señaló, Pesaran et al. (2001, p. 314) para probar la estabilidad de los coeficientes a lo largo del tiempo, utilizaron los gráficos de las pruebas CUSUM y

CUSUMQ desarrolladas por Brown et al. (1975). En este caso, al ser un elemento propio de la metodología seguida, se describe en qué consisten estas pruebas en seguida.

Los gráficos CUSUM (*Cumulative Sum*) y CUSUMQ (al cuadrado) son herramientas útiles para analizar la estabilidad de las relaciones de regresión a lo largo del tiempo. Estos gráficos se utilizan en el contexto de verificar la constancia de las relaciones de regresión a través de períodos consecutivos de tiempo, lo cual es crucial en series temporales y análisis de datos longitudinales.

#### Gráfico CUSUM (*Cumulative Sum*)

El gráfico CUSUM se construye calculando la suma acumulativa de los residuos estandarizados de un modelo de regresión a lo largo del tiempo. Se define un punto de referencia, generalmente cero, que representa la suposición de que la relación de regresión es constante. Si la relación de regresión cambia con el tiempo, los residuos tenderán a desviarse sistemáticamente de cero. Esto se reflejará en el gráfico CUSUM como una tendencia ascendente o descendente desde el punto de referencia. Un gráfico CUSUM que permanece cerca de cero indica estabilidad en la relación de regresión. Desviaciones significativas pueden indicar cambios estructurales en los datos o en la relación subyacente que está siendo modelada.

#### Gráfico CUSUM al cuadrado

El gráfico CUSUMQ es similar al CUSUM estándar, pero en lugar de los residuos estandarizados, se utilizan los cuadrados de estos residuos. Se construye sumando acumulativamente los cuadrados de los residuos estandarizados a lo largo del tiempo. Este gráfico es útil cuando se quiere enfatizar desviaciones mayores en los residuos, ya que los cuadrados de los residuos amplifican las desviaciones más grandes en comparación con los residuos estándar. Al igual que con el CUSUM estándar, un gráfico CUSUM al cuadrado

cerca de cero indica estabilidad en la relación de regresión. Desviaciones significativas hacia arriba o hacia abajo pueden indicar cambios estructurales o no linealidades en la relación.

## Capítulo VI. Análisis e interpretación de los resultados

*Hallazgos como de los Galileo y Kepler fueron fundamentales para la construcción de nuevo conocimiento científico que hasta la fecha sigue teniendo influencia en las nuevas generaciones de investigadores, solo por mencionar un par de ejemplos históricos, los estudios del movimiento de Galileo llevarían a la formulación de la ley de la gravitación universal de Newton, esta ley a su vez, sería crucial para la formulación de la teoría de la relatividad de Einstein.*

El objetivo de este capítulo es presentar los resultados obtenidos con base en la experimentación econométrica, en el orden que se estructuró en capítulo anterior, analizan e interpretan en cada de una de las etapas.

### 6.1 Análisis exploratorio de variables

El análisis exploratorio de las variables se realiza a partir de la estadística descriptiva presentada en la tabla 5 y del análisis gráfico presentado en la figura 14. La tabla 5 presenta para cada variable sus medidas de tendencia central: media, mediana, desviación estándar, rango o amplitud (diferencia del valor máximo y el valor mínimo), así como su matriz de correlación, complementariamente, la figura 14, muestra los gráficos de líneas para cada una de las series temporales del modelo en logaritmos naturales durante el periodo de 1970 a 2022.

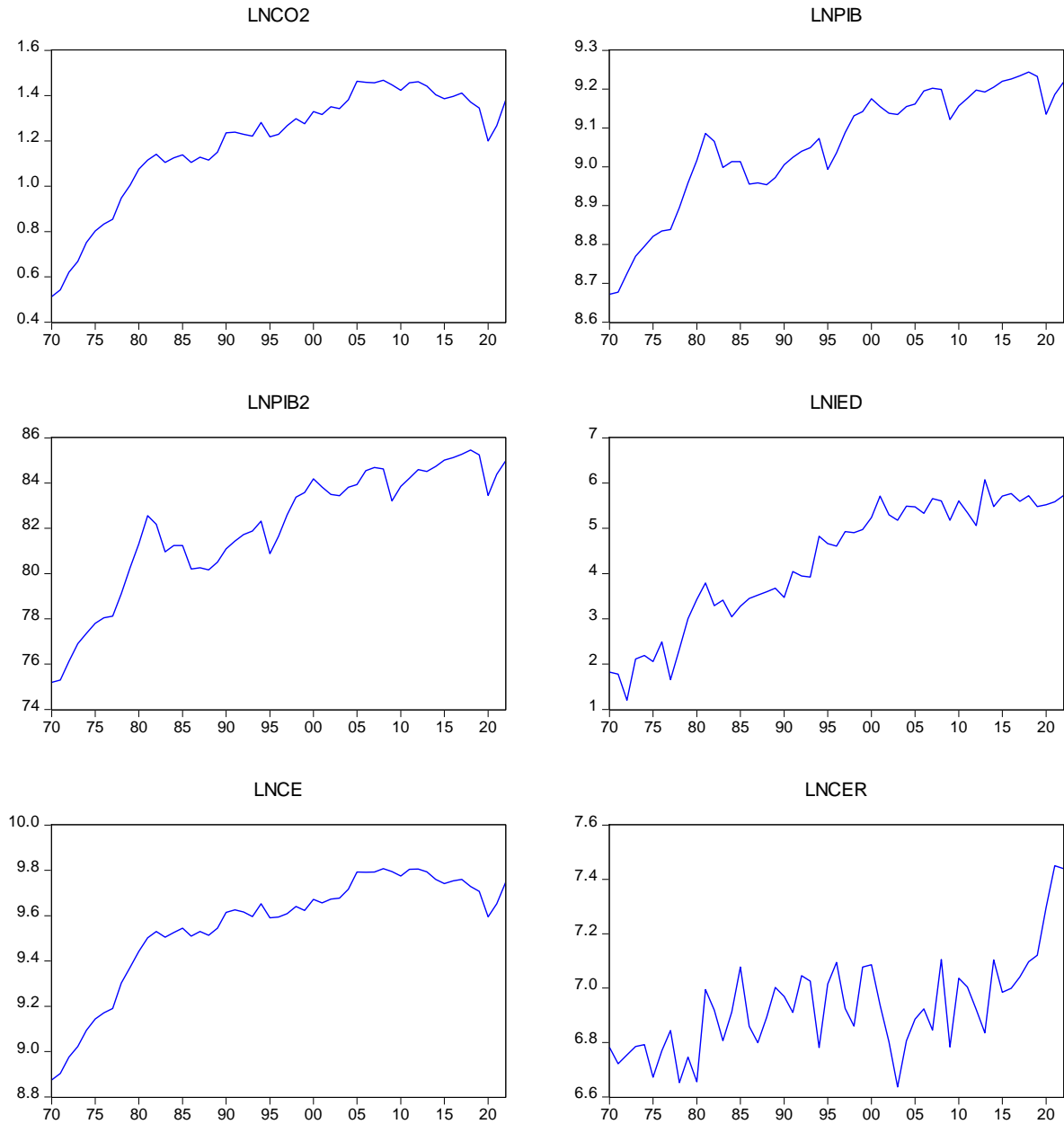
Tabla 5. Estadística descriptiva de las variables de estudio

	LNCO2	LNPIB	LNPIB2	LNIED	LNCE	LNCER
Media	1.1921	9.0540	81.9985	4.2689	9.5537	6.9299
Mediana	1.2383	9.0860	82.5563	4.8222	9.6162	6.9191
Valor máximo	1.4678	9.2440	85.4533	6.0735	9.8077	7.4500
Valor mínimo	0.5128	8.6716	75.1975	1.2034	8.8751	6.6368
Rango	0.955	0.5724	10.2558	4.8701	0.9326	0.8132
Desv. Est.	0.2505	0.1531	2.7531	1.3698	0.2476	0.1759
Matriz de correlación						
LNCO2	1					
LNPIB	0.9586	1				
LNPIB2	0.9573	0.9999	1			
LNIED	0.9285	0.9489	0.9497	1		
LNCE	0.9959	0.9531	0.9514	0.9160	1	
LNCER	0.4474	0.5426	0.5435	0.5302	0.4758	1

Fuente: Elaboración propia

La primera serie que se presenta es la variable dependiente, emisiones de CO2 por habitante transformada a logaritmos naturales (LNCO2). Durante el periodo, LNCO2 tiene un promedio de 1.1921, una mediana de 1.2383, su valor máximo es 1.4678 mientras que su valor mínimo es de 0.5128, lo que indica un rango de 0.955. Su desviación estándar es de 0.2505.

Figura 14. Gráficos de variables modeladas en logaritmos naturales, 1970 a 2022.



Fuente: Elaboración propia

La segunda serie presentada es el PIB per cápita en sus logaritmos naturales (LNPIB). Durante el periodo, LNPIB tiene un promedio de 9.0540, una mediana de 9.0860, su valor máximo es de 9.2440 mientras que su valor mínimo es 8.6716, lo que indica un rango de 0.5724. Su desviación estándar es de 0.1531.

La tercera serie presentada es el PIB per cápita al cuadrado en sus logaritmos naturales (LNPIB2). Durante el periodo, LNPIB2 tiene un promedio de 81.9985, una mediana de 82.5563, su valor máximo es de 85.4533 mientras que su valor mínimo es 75.1975, lo que indica un rango de 10.2558. Su desviación estándar es de 2.7531.

La cuarta serie presentada es la inversión extranjera directa por habitante en logaritmos naturales (LNIED). Durante el periodo, LNIED tiene un promedio de 4.2689, una mediana de 4.8222, su valor máximo es de 6.0735 mientras que su valor mínimo es 1.2034, lo que indica un rango de 4.8701. Su desviación estándar es de 1.3698.

La quinta serie presentada es el consumo por habitante de energía primaria proveniente de fuentes fósiles en logaritmos naturales (LNCE). Durante el periodo, LNCE tiene un promedio de 9.5537, una mediana de 9.6162, su valor máximo es de 9.8077 mientras que su valor mínimo es 8.8751, lo que indica un rango de 0.9326. Su desviación estándar es de 0.2476.

La última serie del modelo que se presenta es el consumo por habitante de energía primaria proveniente de fuentes renovables en logaritmos naturales (LNCER). Durante el periodo, LNCER tiene un promedio de 6.9299, una mediana de 6.9191, su valor máximo es de 7.4500 mientras que su valor mínimo es 6.6368, lo que indica un rango de 0.8132. Su desviación estándar es de 0.1759.

Este análisis gráfico complementado con la estadística descriptiva, a diferencia del realizado en el capítulo anterior dónde se dieron las explicaciones del comportamiento de las variables presentadas en sus valores reales, busca conocer tempranamente los siguientes aspectos clave:

(i) El tipo de proceso estadístico que se presentan las series. Es decir, si son series estacionarias o con caminata aleatoria. También si es visible algún cambio estructural.

(ii) Si las relaciones que presentan las series son las predichas por la teoría o existe un comportamiento no esperado.

(iii) Prever posibles problemas en relación con los supuestos básicos de los modelos de regresión.

El análisis gráfico para LNCO2 muestra un proceso estocástico de camina aleatoria sin deriva, al tomar su promedio de 1.1921 como referencia se puede notar que la media no es constante a lo largo del tiempo. Por ejemplo, de 1970 a 1982 LNCO2 promedia 0.8359 unidades logarítmicas, mientras que de 1983 a 2013 promedia 1.2953, después del año 2013 se puede notar que existe un cambio a la baja en la trayectoria de la serie, del 2013 a 2022 su promedio es 1.3510 logaritmos.

A sí mismo, la varianza tampoco es constante a lo largo del periodo ya que presenta distintas amplitudes en los segmentos descritos. Por lo tanto, es altamente probable que las pruebas de raíz unitaria comprueban una serie no estacionaria ni constante ni en tendencia. Podría ser probable también que la prueba LS señale cambios estructurales alrededor de los años de 1982 y 2013.

LNCO2 está fuertemente correlacionada de manera positiva con casi todas las series del modelo al arrojar correlaciones de Pearson de 0.9586 con LNPIB, 0.9573 con LNPIB2, 0.9285 con LNIED, 0.9959 con LNCE y 0.4474 con LNCER. De estos resultados, es interesante notar que el LNCO2 tiene una correlación casi perfecta como LNCE y más fuerte que con LNPIB, lo que podría indicar que el impacto del consumo de energía es mayor al del crecimiento económico.

La excepción a las altas correlaciones es con LNCER, se esperaría un resultado alto pero negativo debido al impacto predicho por la literatura, sin embargo, el coeficiente es de 0.4474 lo que a pesar de ser bajo, podría indicar un impacto positivo del consumo de



energía renovables hacia las emisiones de CO<sub>2</sub>. En el caso de la IED se presenta un resultado positivo lo cual es un primer apoyo a la hipótesis del paraíso de contaminación, sin embargo, hasta ahora es un resultado débil.

La serie LNPIB muestra también un proceso estocástico de camina aleatoria sin deriva, su promedio de 9.0540 tampoco es constante a lo largo del tiempo. De 1970 a 1982 LNPIB promedia 8.8579 unidades logarítmicas, mientras que de 1983 a 2022 promedia 9.1177. Este segundo momento del promedio es más cercano al promedio general, sin embargo, no se podría afirmar que la media es constante debido a las a los diversos cambios que la serie presenta a partir de este periodo.

Del mismo modo, la varianza presenta diversas amplitudes a lo largo del periodo, gráficamente es una de las series que mayores cambios de varianza presenta a lo largo de la muestra. Por lo tanto, es altamente probable que las pruebas de raíz unitaria comprueban una serie no estacionaria ni constante ni en tendencia. La prueba LS podría señalar cambios estructurales alrededor del año de 1982, para algún otro año, gráficamente no es claro el cambio estructural pero la prueba LS podrá encontrarlo de manera estadística.

LNPIB está altamente correlacionada, además de LNCO<sub>2</sub> anterior, de manera positiva en 0.9999 con LNPIB<sub>2</sub>, 0.9489 con LNIED, 0.9531 con LNCE y en 0.5426 con LNCER. El resultado con LNPIB<sub>2</sub> no es de extrañarse ya que es en realidad la misma variable elevada al cuadrado, pero el hecho de que esté altamente correlacionada también con otras variables explicativas podría generar problemas de multicolinealidad.

El caso de la serie LNPIB<sub>2</sub> es un caso singular, gráficamente presenta un comportamiento idéntico o casi idéntico a LNPIB excepto por los rangos más altos en la escala logarítmica, como se ha mencionado esto no es de extrañarse debido a que son la misma variable en

términos lineal y cuadrado. Es importante señalar que, en efecto, LNPIB2 se ha incluido en este contexto para probar la hipótesis de la CAK.

En este sentido, los valores de la estadística descriptiva podrían obviarse. Sin embargo, no del todo, al ser modelada como una serie temporal en las regresiones, estadísticamente tendrá las mismas propiedades que cualquier otro regresor, en otras palabras su inclusión además de permitir probar la hipótesis CAK, no deja de tener influencia en el modelado econométrico, por ejemplo, al estar correlacionada al mismo nivel que LNPIB, podría aumentar el riesgo de colinealidad. Este tema se retomará en los resultados generales y en la discusión del capítulo.

La serie LNIED muestra un proceso estocástico de camina aleatoria pero su tendencia podría estar sugiriendo un paseo aleatorio con deriva. Es decir, los valores de la serie no oscilan alrededor de una media constante, sin embargo, podrían oscilar alrededor de una tendencia, si esto es así, la serie podría mostrar estacionariedad en tendencia. Aquí, las pruebas de raíz de unitaria serán de gran ayuda para confirmar si se presenta estacionariedad en este sentido.

En este contexto, una vez más sería arriesgado señalar previamente un posible cambio estructural de la serie de manera gráfica, así que se dejará para la confirmación de la prueba de raíz unitaria pertinente. LNIED está fuertemente correlacionada de manera positiva, además de los resultados ya indicados, en 0.9160 con LNCE y en 0.5302 con LNCER.

La serie LNCER muestra un proceso estocástico de camina aleatoria sin deriva podría estar sugiriendo un paseo aleatorio con deriva. Es decir, los valores de la serie no oscilan alrededor de una media constante, sin embargo, podrían oscilar alrededor de una tendencia, si esto es así, la serie podría mostrar estacionariedad en tendencia. Aquí, las pruebas de raíz de unitaria serán de gran ayuda para confirmar la estacionariedad.

En este contexto, una vez más sería arriesgado señalar previamente un posible cambio estructural de la serie de manera gráfica, así que se dejará para la confirmación de la prueba de raíz unitaria pertinente. LNIED está fuertemente correlacionada de manera positiva, además de los resultados ya indicados, en 0.9160 con LNCE y en 0.5302 con LNCER.

En cuanto a la serie LNCE, ésta sugiere nuevamente un proceso estocástico de camina aleatoria sin deriva, su promedio de 9.5537 no es constante a lo largo del tiempo. Del mismo modo que LNCO2, de 1970 a 1982 promedia 9.1942 unidades logarítmicas, mientras que de 1983 a 2013 promedia 9.6574, después del año 2013 se puede notar el mismo cambio a la baja en la trayectoria de la serie, del 2013 a 2022 su promedio es 9.7159 logaritmos.

En cuanto a su varianza, se observa que no es constante a lo largo del periodo ya que presenta distintas oscilaciones en los segmentos descritos. De igual modo, es altamente probable que las pruebas de raíz unitaria comprueban una serie no estacionaria ni constante ni en tendencia. Al tener un comportamiento muy similar a LNCO2 puede ser probable también que la prueba LS señale cambios estructurales alrededor de los mismos años de 1982 y 2013. Además de las correlaciones indicadas en otras series, LNCE muestra una baja correlación positiva de 0.4758 con LNCER.

Finalmente, la serie LNCER podría ser la única serie de tiempo un presentar un proceso estacionario, si se observa gráficamente su comportamiento, se puede notar que sus valores, aunque no de manera exacta, sugieren estar oscilando alrededor de su media de 6.9299 a lo largo del tiempo, adicionalmente, la amplitud también sugiere una variación constante a lo largo de la muestra, únicamente los datos más recientes son lo que presentan un comportamiento distinto al general. En cuanto a la correlación con las demás variables explicativas cabe mencionar que LNCER es que la presentó las correlaciones más bajas para todas las series. De manera general las altas correlaciones entre las variables independientes podrían alertar de un problema de colinealidad.

## 6.2 Pruebas de raíz unitaria

Esta sección presenta los resultados de las pruebas de raíz unitaria Dickey-Fuller Aumentada (ADF) y Phillips-Perron (PP) en la tabla 6 así como la prueba de Lee y Strazicich (LS) que detecta la presencia de hasta dos cambios estructurales en la tabla 7. En el caso de ADF y PP, se contrastan las series tanto en constante como en constante y tendencia.

Tabla 6. Resultados de las pruebas ADF y PP

Test ADF	Niveles	LNCO2	LNPIB	LNPIB2	LNIED	LNCE	LNCER
C	Estadístico t	-3.6928	-2.5146	-2.455	-3.1171	-4.0155	-2.5683
	Prob.	0.007	0.1179	0.1323	0.0323	0.0028	0.106
		***	n0	n0	**	***	n0
C y T	Estadístico t	-2.2267	-3.2539	-3.2426	-1.8045	-2.3329	-4.0603
	Prob.	0.4652	0.0858	0.0878	0.686	0.4093	0.0125
		n0	*	*	n0	n0	**
<b>Primeras diferencias</b>		<b>d(LNCO2)</b>	<b>d(LNPIB)</b>	<b>d(LNPIB2)</b>	<b>d(LNIED)</b>	<b>d(LNCE)</b>	<b>d(LNCER)</b>
C	Estadístico t	-5.5488	-3.8976	-3.9305	-7.8428	-5.2285	-3.3547
	Prob.	0	0.0042	0.0038	0	0.0001	0.0178
		***	***	***	***	***	**
C y T	Estadístico t	-4.9672	-4.2353	-4.2615	-3.3015	-6.0105	-3.4791
	Prob.	0.001	0.0083	0.0078	0.079	0	0.0534
		***	***	***	*	***	*
<b>Test PP</b>	<b>Niveles</b>	<b>LNCO2</b>	<b>LNPIB</b>	<b>LNPIB2</b>	<b>LNIED</b>	<b>LNCE</b>	<b>LNCER</b>
C	Estadístico t	-4.3338	-2.6997	-2.6327	-1.4882	-4.265	-2.5683
	Prob.	0.0011	0.0809	0.093	0.5317	0.0013	0.106
		***	*	*	n0	***	n0
C y T	Estadístico t	-2.2444	-2.6511	-2.6517	-2.7771	-2.3574	-4.0363
	Prob.	0.4558	0.2606	0.2603	0.212	0.3968	0.0133
		n0	n0	n0	n0	n0	**
<b>Primeras diferencias</b>		<b>d(LNCO2)</b>	<b>d(LNPIB)</b>	<b>d(LNPIB2)</b>	<b>d(LNIED)</b>	<b>d(LNCE)</b>	<b>d(LNCER)</b>
C	Estadístico t	-5.5488	-6.1236	-6.1623	-10.6708	-5.2039	-12.2986
	Prob.	0	0	0	0	0.0001	0
		***	***	***	***	***	***
C y T	Estadístico t	-6.1118	-6.3377	-6.3703	-12.8547	-5.9294	-13.4092
	Prob.	0	0	0	0	0	0
		***	***	***	***	***	***

Fuente: Elaboración propia. Notas. A: (C) Constante, (T) Tendencia. B: (\*) Significancia a 10%, (\*\*) a 5%, (\*\*\*) a 1% y (n0) no significativo. C: Rezagos elegidos por el criterio de información Akaike (AIC). D: Probabilidad (Prob.) basada en los valores P de MacKinnon (1996).

La prueba ADF aplicada para constante señala que las series LNCO2, LNIED y LNCE rechazan la hipótesis nula de raíz unitaria en constante a un nivel de significancia del 1%, 5% y 1% respectivamente. Del mismo modo, ADF aplicada para constante y tendencia señala que las series LNPIB, LNPIB2 y LNCER rechazan la hipótesis nula de raíz unitaria en constante y tendencia con un nivel de significancia del 10%, 10% y 5% respectivamente. En conjunto, se comprueba entonces que las series son estacionarias en niveles (con las características señaladas), o, en otras palabras, son variables  $I(0)$ .

El test ADF aplicado a las series transformadas a primeras diferencias indica en el contraste en constante que la serie LNCER rechaza la hipótesis nula de raíz unitaria a nivel de confianza del 5%, en todos los demás casos, las series rechazan presencia de raíz unitaria a un nivel de confianza del 1%. En el contraste aplicado para constante y tendencia las series LNIED y LNCER rechazan la presencia de raíz unitaria a un nivel de significancia del 10%, en las demás series se rechaza la hipótesis nula a un nivel de confianza del 1%.

En conjunto, el test ADF comprueba que las series son estacionarias también en primeras diferencias, es decir, son variables integradas de orden uno,  $I(1)$ . Con este primer contraste de raíz unitaria se justificaría la utilización de la técnica ARDL de límites para cointegración puesto que precisamente fue desarrollada para los casos en los que las variables son, o bien  $I(0)$ , o bien  $I(1)$  o mutuamente cointegradas. Sin embargo, para tener certeza de estos resultados, se revisan los test PP y LS.

El test PP, aplicando el contraste a constante señala que las series LNCO2 y LNCE rechazan la hipótesis nula de raíz unitaria a un nivel de significancia del 1%, LNPIB y LNPIB2 por su cuenta rechazan la hipótesis nula a nivel de significancia del 10%. Para el contraste en constante y tendencia, PP indica que, en este caso únicamente la serie LNCER rechaza la hipótesis de raíz unitaria al 5% de significancia. En conjunto estas variables

presentan estacionariedad en sus niveles, o bien  $I(0)$ , en el caso de LNIED el test PP indica que no es estacionaria en niveles con ninguno de estos contrastes.

La prueba PP aplicada a las series transformadas a primeras diferencias, indica que tanto en el contraste para constante como en el contraste para constante y tendencia todas las series rechazan la hipótesis nula de raíz unitaria a un nivel de significancia del 1%. Indicando de este modo que las series son estacionarias también en primeras diferencias. La aplicación de la prueba PP justifica también el uso de la técnica ARDL de límites al encontraran nuevamente un orden mixto de estacionariedad en las series. En otro apunte, queda evidenciado que análisis gráfico no sería la mejor vía para detectar la estacionariedad de las variables.

La siguiente tabla presenta el resultado de la prueba para detectar dos cambios estructurales desarrollada por J. Lee & Strazicich (2003). Se aplicó el contraste para las series en niveles y en primeras diferencias.

Tabla 7. Resultados de la prueba de raíz unitaria de Lee y Strazicich

Variable	Nivel (Estadístico)	Fecha	1ra Dif. (Estadístico)	Fecha
LNCO2	-4.811465 No	1982 2011	-6.822850 ***	1980 2016
LNPIB	-5.486869 No	1984 1998	-6.574431 **	1980 1983
LNPIB2	-5.464107 No	1984 1998	-6.569428 **	1980 1983
LNIED	-6.838852 **	1992 2004	-8.424218 ***	1980 2008
LNCE	-4.664147 No	1993 2003	-5.542031 No	1992 2015
LNCER	-6.113084 *	2000 2015	-9.144163 ***	2006 2011

Fuente: Elaboración propia. Notas. A: (\*) Significancia a 10%, (\*\*) a 5%, (\*\*\*) a 1% y (No) no significativo. B: Pruebas de raíz unitaria aplicada con modelo *break*.

El resultado del contraste en niveles señala que las serie LNIED y LNCER rechazan la hipótesis nula de raíz unitaria con cambio estructural a un nivel de significancia del 5% y 10% respectivamente. LS encuentra que los cambios estructurales en LNIED ocurrieron en los años 1992 y 2004 y para LNCER los cambios estructurales habrán ocurrido en los años 2000 y 2015. Estos resultados indican que las series son estacionarias en niveles,  $I(0)$ , con cambio estructural en los años mencionados. En las demás series no es posible rechazar la hipótesis nula.

En el caso del test LS aplicado a las series en primeras diferencias, se comprueba que LNCO2, LNPIB, LNPIB2, LNIED y LNCER rechazan la hipótesis nula de raíz unitaria a un nivel de significancia del 1%, 5%, 5%, 1% y 1% respectivamente, probando con ello que las series también son estacionarias en primeras diferencias,  $I(1)$ . Es interesante notar que para LNCO2, LNPIB, LNPIB2 y LNIED el primer cambio estructural es encontrado en el año 1980, en ese mismo orden los demás cambios estructural se encuentran en los años 2016, 1993 y 2008. Para LNCER sus cambios estructurales se hallan en los años de 2006 y 2011.

En cuanto a la serie LNCE, la prueba LS señala que no es estacionaria ni en niveles ni en primeras diferencias lo cual es algo inesperado. Con el objetivo de verificar este resultado en las mismas condiciones de cambio estructural, se emplea la prueba de Zivot & Andrews (2002) que tiene la capacidad contrastar la hipótesis nula de raíz unitaria en presencia de un cambio estructural y de esta manera descartar o confirmar que la serie sea  $I(2)$ .

El test de Zivot y Andrews (ZA) no rechaza la hipótesis en LNCE en niveles con un valor p de 0.6063 en el contraste en tendencia indicando no estacionariedad en niveles, en cuanto al contraste aplicado a sus primeras diferencias para constante, el test ZA rechaza la hipótesis nula a un nivel de significancia del 1% (valor p de 0.0062) encontrando un cambio estructural en el año 1982.

Se repite la prueba ZA para tendencia y nuevamente se rechaza la hipótesis nula de raíz unitaria a un nivel de significancia del 5% (valor p de 0.0127) en presencia de un cambio estructural en el año 1987. De este modo se comprueba que la variable LNCE es estacionaria en primeras diferencias,  $I(1)$ , y descarta la posibilidad de una serie  $I(2)$ .

De manera conjunta las pruebas LS y ZA confirman también que las series son estacionarias de orden mixto,  $I(0)$  o  $I(1)$ , pero en ningún caso integradas de orden dos,  $I(2)$ . Por lo tanto existen las condiciones necesarias para la utilización de la técnica econométrica ARDL con prueba de límites para cointegración. Por lo tanto, el siguiente paso de la metodología es estimar el modelo de corrección de errores no restringido.

De manera específica, los cambios estructurales de 1980, 1982 y 1983 que se presentan en las series LNCO<sub>2</sub>, LNPIB, LNIED y LNCE, son explicados por la marcada inestabilidad económica y financiera de la década de los 1980 en México, que se produjo debido a la desaceleración del crecimiento económico caracterizada por fuertes choques externos, una aguda inestabilidad macroeconómica y una continua transferencia de recursos hacia el exterior en el marco de un severo racionamiento del crédito externo. En específico por el déficit del sector público de 17.6% del PIB, el déficit en la cuenta corriente de 4% del PIB y la inflación de 61.0% entre los años de 1981 y 1982. Estos problemas se agravarían en el transcurso de esos años provocando una inflación de hasta 141% entre 1986 y 1987 (Ros (2008) y Kehoe et al. (2013)).

Por otro lado, el cambio estructural de 2016 LNCO<sub>2</sub> es probable que se deba a la reforma energética de 2013 y que empezaría a ver resultados alrededor de esos años lo mismo que el cambio estructural de 2015 en LNCE. En el caso del cambio estructural de LNIED 2008 resulta visible el impacto de la crisis financiera de 2008 en las entradas de capital extranjero al país considerando que el principal inversor es Estados Unidos.



Finalmente, entre los acontecimientos que pueden estar marcando los cambios estructurales de 2006 y 2011 en LNCER, se encuentran la promulgación en 2008 de la “Ley Para El Aprovechamiento De Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética” y el incremento del 83.24% (desde la década del 2000) en el uso de gas natural que es utilizado en gran parte para la generación de energía hidroeléctrica y termoeléctrica en el país.

### 6.3 Modelo ARDL preliminar y evaluación de supuestos básicos de regresión

La tabla 8 reporta los resultados del modelo de corrección de errores (ECM) no restringido vinculado a la técnica ARDL. Como se apuntó, a partir de los resultados de este modelo es que se realiza la prueba de límites basadas en Pesaran et al. (2001), antes de ello, se debe comprobar que el modelo supere las pruebas de diagnóstico y entonces puede ser considerado económicamente válido para la inferencia estadística.

Tabla 8. Resultados del modelo de ECM no restringido.

Variable	Coefficiente	Estadístico t	Probabilidad
C	11.6682	2.2825	0.0297
TCE	-0.1990	-2.9693	0.0058
LNPIB(-1)	-2.7497	-2.3334	0.0265
LNPIB2(-1)	0.1429	2.2039	0.0353
LNIED(-1)	0.0214	6.3817	0.0000
LNCE(-1)	0.1696	2.6561	0.0125
LNCER(-1)	0.0052	0.5371	0.5951
DUMMY**	0.0167	2.9428	0.0062
D(LNCO2(-1))	-0.1401	-1.1390	0.2637
D(LNPIB)	-12.0063	-4.7243	0.0001
D(LNPIB(-1))	-1.5803	-0.5881	0.5608
D(LNPIB(-2))	-7.7452	-3.1871	0.0033
D(LNPIB2)	0.6603	4.7274	0.0001
D(LNPIB2(-1))	0.0907	0.6135	0.5441
D(LNPIB2(-2))	0.4250	3.1832	0.0034
D(LNIED)	0.0030	1.1181	0.2724
D(LNCE)	1.0815	30.5782	0.0000
D(LNCE(-1))	0.1778	1.3197	0.1969
D(LNCE(-2))	0.0645	1.5952	0.1211
D(LNCER)	-0.0219	-2.7578	0.0098
R <sup>2</sup>	0.9996		
R <sup>2</sup> ajustado	0.9993		
Normalidad (Jarque Bera)			0.2876
Correlación serial (LM)			0.2074
Heterocedasticidad (BPG)			0.0854
Especificación (Ramsey RESET)			0.4232

Fuente: Elaboración propia. Nota: la variable DUMYY (\*\*) corresponde a la firma del TLCAN de 1994.

En este sentido, se diagnostica de manera inicial el supuesto de normalidad, el resultado de la prueba Jarque-Bera bajo la hipótesis nula de normalidad arroja un valor p de 0.2876 el cual es superior al valor crítico de 0.05, este resultado no permite rechazar la hipótesis nula de normalidad, en otras palabras, se acepta la hipótesis nula de que los residuos del modelo se distribuyen de manera normal.

El siguiente resultado es el de la prueba de diagnóstico LM para el supuesto de no autocorrelación de los residuos de Breusch-Godfrey, el valor p arrojado es de 0.2074, este valor tampoco permite rechazar la hipótesis nula de no autocorrelación de los residuos, dado este resultado se acepta entonces la hipótesis nula indicando la ausencia de este problema.

Siguiendo con las pruebas de diagnóstico, el test BPG (Breusch-Pagan-Godfrey) para el supuesto de no Heterocedasticidad arrojó un resultado de 0.0854, valor que no rechaza la hipótesis nula de ausencia de heterocedasticidad, en decir, se acepta la que los residuos son homocedasticos. Por último, la prueba Ramsey RESET para evaluar especificación del modelo arrojó un resultado de 0.2630 lo que no permite rechazar la hipótesis nula de especificación adecuada, por lo tanto, el modelo se encuentra correctamente especificado.

Una vez cumplidos los supuestos básicos de regresión, se lleva a cabo la evaluación de la bondad de ajuste del modelo estimado por medio del coeficiente de determinación  $R^2$  y  $R^2$  ajustado, sus valores respectivos son de 0.9996 y 0.9993, lo que indica que las variaciones de las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita, son explicadas en un 99.99% por las variaciones de los regresores PIB, PIB<sup>2</sup>, IED, CE y CER también en términos per cápita. Este resultado demuestra la alta bondad de ajuste del modelo estimado.

Del modelo ECM no restringido en la tabla 8, se pueden llevar a cabo algunas interpretaciones sobre todo de los coeficientes de corto plazo, sin embargo, la naturaleza de la prueba de límites sugiere probar primero la existencia de una relación cointegrante, es decir, si existe una relación de largo plazo entre las variables. Si la cointegración se comprueba, entonces, tiene sentido analizar e interpretar primero los coeficientes de largo plazo y luego analizar e interpretar como es que estos valores se ajustan desde sus valores de corto plazo. Si la cointegración no se comprueba entonces tanto los coeficientes de largo como de corto plazo serían muy poco (o tal vez nada) fiables.

#### 6.4 Prueba de límites para cointegración y estimación de coeficientes de largo plazo

La tabla 9, presenta los resultados de la prueba de límites para cointegración, posteriormente la tabla 10 reporta los resultados de largo plazo del modelo estimado.

Bajo la hipótesis nula de no cointegración, la regla de decisión parte del estadístico de prueba F, para comprobar una relación de largo plazo entre las variables, el valor del estadístico debe estar por encima de los límites superiores de los casos polares de series I(0) e I(1), propuestos por Pesaran et al. (2001). Dado que la muestra resultante de modelo ARDL es de 50 observaciones también se hace el contraste del F estadístico con los propuestos por Narayan (2005). Si esto es así, entonces se confirma la relación de cointegración entre las variables.

De otro modo, sí el valor del estadístico F se sitúa por debajo de los límites inferiores, entonces, no se puede rechazar la hipótesis nula de no cointegración. Si el valor se sitúa, entre el valor inferior y superior, entonces, la relación no es concluyente.

Tabla 9. Resultados de la prueba límites (*bound test*) para cointegración.

Prueba de límites ( <i>Bound test</i> )			H0: No cointegración	H1: Cointegración	
Estadística de prueba	Valor	Significancia	I(0)	I(1)	
Asintótica: n=1000					
Estadístico F	9.296974	10%	2.12	3.23	Sí
Grados de libertad	6	5%	2.45	3.61	Sí
Pesaran et al. (2001)		2.5%	2.75	3.99	Sí
		1%	3.15	4.43	Sí
Muestra finita: n=50					
Tamaño de muestra	50				
Narayan (2005)		10%	2.309	3.507	Sí
		5%	2.726	4.057	Sí
		1%	3.656	5.331	Sí

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 9, arroja un estadístico F con valor de 9.2969 para seis grados de libertad (total de variables modeladas), el cual está por encima a los valores críticos propuestos por Pesaran et al. (2001), que se establecieron en 3.15 de límite superior en el extremo de que todas las series sean  $I(0)$  y en 4.43 de límite superior en el extremo de que todas las series sean  $I(1)$  para un nivel de significancia del 1%. El resultado de estadístico también es mayor para los límites críticos propuestos por Narayan (2005) establecidos en 3.65 y en 5.33 para un nivel de significancia del 1% con 6 grados de libertad y una muestra de 50 observaciones.

En conclusión, la prueba de cointegración por medio del enfoque ARDL de límites confirma la existencia de una relación de largo plazo entre las variables emisiones de CO<sub>2</sub>, crecimiento económico, inversión extranjera directa, consumo de energía y consumo de energía renovable a un nivel de significancia del 1%. Una vez confirmada la relación de largo plazo entre las variables, el siguiente paso es estimar sus coeficientes de largo plazo por medio del modelo especificado anteriormente.

Estos coeficientes muestran cómo una unidad de cambio en las variables explicativas afecta a la variable dependiente después de que las dinámicas de corto plazo se han ajustado por medio del TCE, al modelarse las series en logaritmos naturales su interpretación se realiza en elasticidades. En la tabla 10 se reportan estos resultados.

Tabla 10. Resultados de la estimación para coeficientes de largo plazo

Variable	Coeficiente	Estadístico t	Probabilidad
LNPIB	-13.8114	-2.7230	0.0107
LNPIB2	0.7177	2.6371	0.0131
LNIED	0.1079	3.8304	0.0006
LNCE	0.8519	9.3568	0.0000
LNCER	0.0264	0.5546	0.5833
DUMMY	0.0843	3.2169	0.0031

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el modelo estimado en el largo plazo, la variable LNPIB obtuvo un coeficiente negativo y significativo al 5% (valor p de 0.0107) de -13.8114, es decir, por cada 1% de incremento porcentual de Producto Interno Bruto per cápita las emisiones de CO<sub>2</sub> por habitante disminuirán en 13.81%. Este primer resultado debe tomarse con reserva debido a que se debe interpretar de manera conjunta con el término cuadrático. Si no fuera así, se afirmarí­a que el crecimiento económico está disminuyendo las emisiones a un ritmo acelerado lo cual dista mucho de la realidad en México.

La variable LNPIB2 obtuvo un resultado positivo y significativo al 5% (valor p de 0.0131) de 0.7177, lo que indica que por cada 1% en el PIB (per cápita) las emisiones de CO<sub>2</sub> (también per cápita) aumentarán en 0.7177%. En conjunto, los resultados de LNPIB y LNPIB2 comprueban una relación en forma U en el contexto de la curva medioambiental de Kuznets, la cual postula que existe el crecimiento económico en sus primeras fases tiene un efecto perjudicial para el medioambiente, pero a medida que el nivel de ingresos aumenta, la calidad ambiental comienza a mejorar después de un punto de inflexión.

Los resultados anteriores indican que para el caso de México es lo contrario, en las primeras fases de crecimiento las emisiones de CO<sub>2</sub> disminuyen y a medida que el PIB per cápita

incrementa, las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita incrementa también. Estos resultados se discuten en la sección correspondiente.

Continuando con el análisis, la variable LNIED obtuvo un coeficiente positivo y significativo al 1% (valor p de 0.0006), esto expresa que por cada 1% de incremento en la inversión extranjera directa por habitante las emisiones de CO<sub>2</sub> aumentarán en 0.1079%. Este resultado dado el signo del coeficiente positivo comprueba la hipótesis del paraíso de contaminación, sin embargo, dado el impacto relativamente bajo del coeficiente podría afirmarse que la PHH se comprueba de forma débil para el caso de México.

En el caso de la variable LNCE se obtuvo un coeficiente positivo y significativo al 1% (valor p de 0.0000) de 0.8519, este resultado es el predicho por la teoría y por los datos al descubierto y señala que por cada 1% de incremento en el consumo de energía fósil por habitante las emisiones de CO<sub>2</sub> se incrementarán en 0.8519%. Por otro lado, este coeficiente muestra el alto impacto que tiene el consumo de energía fósil en las emisiones de CO<sub>2</sub> por habitante.

En cuanto a la variable LNCER obtuvo un coeficiente positivo de 0.0264 pero no es significativo a ningún nivel de confianza (valor p de 0.5833). Este resultado es contrario a lo predicho por la literatura teórica y empírica, a pesar de la no significancia del coeficiente, resulta interesante el hecho de que el consumo de energía de fuentes renovables tenga un impacto positivo, es decir, incremente las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita cuando lo “esperado” es que el consumo de energía más limpia mitigue las emisiones de CO<sub>2</sub>. A raíz de este resultado se sugiere llevar a cabo una investigación exclusiva para el consumo de energía renovable y CO<sub>2</sub> para México.

Finalmente, la variable *dummy* que captura el cambio estructural de 1993, año desde que México suscribe el T-MEC, arrojó un coeficiente positivo y significativo al 1% (valor p de

0.0031) de 0.0843, la interpretación de este resultado es diferente a las variables ordinarias, expresando más bien que este cambio estructural afecta al modelo en su generalidad. Este cambio estructural se incluyó en lugar de alguno marcado por el test LS o ZA, al evaluar los residuos de la regresión y notar que en ese año se generaba el error más alto. Al incluirlo, corrigió también un posible problema de Autocorrelación presentando sin la variable *dummy*.

#### 6.5 Estabilidad de los estimadores y confirmación de resultados por MCO.

La figura 15 reporta los resultados CUSUM y CUSUM al cuadrado (CUSUMQ), como se dijo, estos gráficos son útiles para analizar la estabilidad de los coeficientes a largo plazo en la regresión.

El panel a CUSUM, se construyó calculando la suma acumulada de los residuos estándar del modelo de regresión. Su interpretación es que, a partir del punto de referencia, cero, que representa la posición de que la relación de regresión es constante, si la relación de regresión cambia con el tiempo, los residuos tenderán a desviarse sistemáticamente de cero, esto se reflejará en el gráfico CUSUM como una tendencia ascendente o descendente desde el punto de referencia e indicará por lo tanto una relación no estable a lo largo del tiempo.

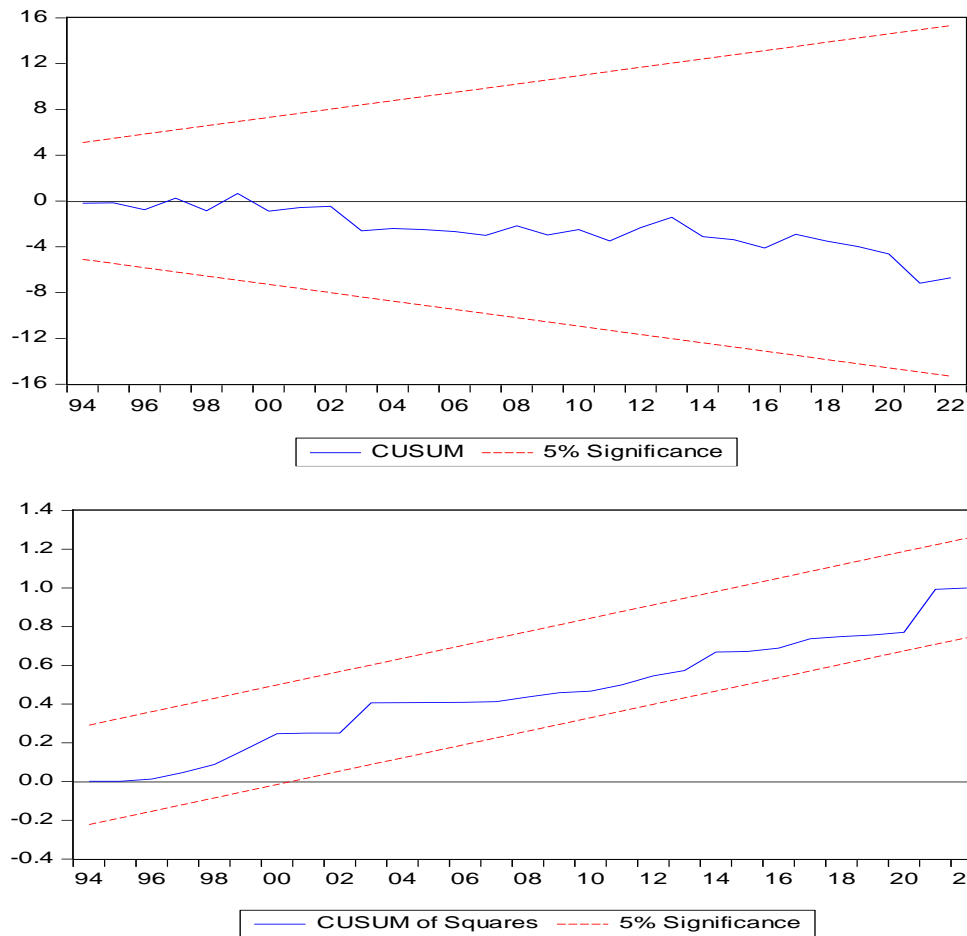
En otras palabras, si la relación no es firme a lo largo del tiempo y los estimadores no son estables, entonces la línea del panel a (línea azul), saldrá de la región crítica especificada (líneas punteadas rojas) para un nivel de significancia del 5%.

En este caso, en el panel a, correspondiente a la suma acumulada de los residuos refleja estabilidad a lo largo del tiempo debido a que los valores CUSUM permanecen dentro de la región crítica para un nivel de confianza del 5%. El panel b, CUSUMQ construido sumando acumuladamente los cuadrados de los residuos estándar, también muestra estabilidad a lo



largo del tiempo debido a que sus valores también permanecen dentro de la región crítica para 5% de nivel de confianza. Con estos resultados, se valida por lo tanto la estabilidad de los coeficientes a lo largo del tiempo.

Figura 15. CUSUM y CUSUMQ



Fuente: Elaboración propia.

Como último paso de la metodología econométrica, se propuso confirmar los resultados obtenidos del enfoque ARDL por medio del modelo de mínimos cuadrados ordinarios (MCO), los resultados de esta estimación presentan en la tabla 11.

Tabla 11. Confirmación de resultados por MCO

Variable	Coefficiente	Estadístico t	Probabilidad
C	14.9954	1.3909	0.1709
LNPIB	-5.0261	-2.0613	0.0449
LNPIB2	0.2840	2.1126	0.0401
LNIED	0.0119	1.9187	0.0612
LNCE	0.9318	21.3386	0.0000
LNCER	-0.0785	-4.8332	0.0000
DUMMY	0.0085	0.4918	0.6251
R <sup>2</sup>	0.9959		
R <sup>2</sup> ajustado	0.9954		
Normalidad (JB)			0.6525
Autocorrelación (LM)			0.0000
Heterocedasticidad (BPG)			0.3715

Fuente: Elaboración propia.

El modelo MCO confirma los resultados de las estimaciones de largo plazo del modelo ARDL de límites, la variable LNPIB muestra un coeficiente negativo y significativo al 5% (valor p 0.0449) de -5.0261 mientras que la variable LNPIB2 muestra un coeficiente positivo y significativo al 5% (valor p 0.0401) de 0.2840, estos resultados confirman que la relación empírica entre degradación ambiental y crecimiento económico, medidas por las emisiones de CO2 y PIB ambos en términos per cápita, es una forma de U.

En el caso de la variable LNIED muestra un coeficiente positivo y significativo al 10% (valor p 0.0612) de 0.0119, confirmando la hipótesis del paraíso de contaminación, sin embargo, en este caso el valor del coeficiente es aún más bajo lo que indicaría que con estos resultados nuevamente la PHH solo puede confirmarse de forma débil en México.

La variable LNCE sigue mostrando un coeficiente positivo y significativo al 1% (valor p 0.0000) de 0.9318, en este caso el impacto es mayor hacia las emisiones de CO2 indicando

que por cada 1% de incremento del consumo de energía fósil las emisiones de CO2 incrementarán en 0.9318% en términos per cápita.

El resultado que es diferente por medio de MCO es el de la variable LNCER que ahora presenta un coeficiente negativo y significativo al 1% (valor p 0.0000) de -0.0785, lo que indica que por cada 1% de incremento en el consumo de energía de fuentes renovables las emisiones de CO2 disminuirán en 0.0785%. El impacto negativo es consistente con la literatura teórica y empírica en cuanto al bajo nivel del coeficiente también tiene congruencia debido a que en México las energías renovables no habían aumentado su participación hasta en los últimos seis años.

De este modo concluye el análisis de resultados arrojados por la experimentación econométrica seguida, en la siguiente sección se aborda una discusión que desde el punto de vista de esta investigación todavía no se ha podido resolver: los puntos de inflexión de la curva medioambiental de Kuznets.

#### 6.6 Discusión ¿Podemos confiar en los coeficientes obtenidos?

De acuerdo con Dinda (2004, p. 441) cuando se confirma una relación en forma de U invertida, el punto de inflexión (Pi o del inglés *turning point*, *TP*) puede calcularse mediante la expresión  $x^* = -\frac{\beta_1}{2\beta_2}$ . La expresión anterior, se obtiene derivando parcialmente la ecuación con el término cuadrático que validó la CAK, en nuestro caso la ecuación 1 con los coeficientes de largo plazo. De este modo, calcular el punto de inflexión estaría dado por la obtención de la derivada parcial de la función  $\ln CO_2$  respecto de  $\ln PIB$ , que simbolizamos como  $\frac{\partial f}{\partial \ln PIB}$ , e igualando el resultado a 0. En este contexto, el resultado mediante coeficientes quedaría como sigue:

$$4.1) \frac{\partial f}{\partial \ln PIB} = \beta_1 + 2\beta_2 X_1 = 0$$

Ahora bien, para encontrar el punto de inflexión a nivel del  $\ln PIB$ , se debe despejar la ecuación en términos de esta variable, obteniendo:

$$4.2) \ln PIB = -\beta_1 / 2\beta_2, \text{ o lo que es lo mismo;}$$

$$4.3) \ln PIB = -\frac{\beta_1}{2\beta_2}$$

De este modo se llega a la expresión 4.3 que es la propuesta por Dinda (2004) en la sección 4.1 de su trabajo *Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey*, si bien es cierto la expresión anterior permite conocer el valor del punto de inflexión en el eje del (eje x), su cálculo está incompleto, ¿Por qué? Al hipotetizar que la forma empírica de la relación entre degradación ambiental y crecimiento económico sigue una forma de  $\Omega$ , en términos matemáticos de manera estricta se adentra en el terreno ya no de una relación lineal, sino de una relación cuadrática, llamada gráficamente parábola. Para explicar el razonamiento, revisemos algunas propiedades fundamentales de las funciones cuadráticas.

#### 6.6.1 Propiedades de una función cuadrática

Una relación cuadrática puede ser expresada en su forma general como una función cuadrática con las siguientes características:

Ecuación 6. Forma general de una función cuadrática

$$f(x) = ax^2 + bx + c$$

Dónde:

$a$ : es el coeficiente del término cuadrático que determina la apertura o concavidad y la amplitud de la parábola, siendo  $a \neq 0$ . Si  $a > 0$  la parábola tiene concavidad positiva (abre hacia arriba, forma U), mientras que si  $a < 0$  tiene concavidad negativa (abre hacia abajo, forma  $\Omega$ ). Además, cuanto más alejada de 0 en términos absolutos se encuentre  $a$ , la

parábola será más angosta, cuanto más cercana se encuentre de 0 (pero no 0, porque en ese caso la función sería lineal), la parábola será más ancha.

$b$ : es el coeficiente del término lineal. Además de otras propiedades, el coeficiente  $b$  geoméricamente contribuye al desplazamiento del vértice de la parábola sobre el eje X.

$c$ : es el término constante. El término constante determina el punto donde la parábola corta el eje  $y$ . Esto significa que cuando  $X$  toma el valor de 0, la parábola cruza en el punto  $(0, c)$ .

El término  $c$  no afecta la forma de la parábola (es decir, si se abre hacia arriba o hacia abajo), pero sí determina su posición vertical. Aumentar o disminuir  $c$  traslada verticalmente la parábola, yendo de arriba abajo si se toma como referencia el eje  $Y$ .

#### Elementos de una parábola

Vértice. El vértice de una parábola es el punto de cruce con su eje de simetría, dependiendo si la parábola tiene concavidad positiva o negativa, será el punto más alto o más bajo de la curva. Su posición en el plano cartesiano puede conocerse calculando sus coordenadas  $(h, k)$  mediante las expresiones matemáticas de  $h$  y  $k$ :

#### Ecuación 7. Coordenadas del vértice de la parábola

$$h = -\frac{b}{2a}, k = f\left(-\frac{b}{2a}\right)$$

Discriminante. El discriminante no tiene una descripción gráfica en el plano cartesiano, sin embargo, matemáticamente se puede describir como la parte dentro de la raíz cuadrada en la fórmula de solución general de la ecuación cuadrática.

Su resultado indica el número de soluciones para una ecuación cuadrática establecida, Si  $D > 0$  la ecuación tiene dos tiene dos raíces diferentes, o bien dos soluciones distintas, lo que significa que la parábola corta el eje  $x$  en dos puntos. Si  $D = 0$ , la ecuación tiene una

raíz doble, o una misma solución, indicando que la parábola toca el eje x en un solo punto. Finalmente, si  $D < 0$ , la ecuación cuadrática no tiene raíces reales, lo que significa que la parábola no corta el eje x en ningún punto. Su expresión matemática es:

Ecuación 8. Discriminante de la parábola

$$D = b^2 - 4ac$$

Valores  $p$  y  $q$ . Son las intersecciones de la parábola en el eje X. Si la parábola tiene concavidad positiva (abre hacia arriba) y su vértice se encuentra por encima del eje X, los valores  $p$  y  $q$  no están definidos, al igual que cuando la parábola tiene concavidad negativa (abre hacia abajo) y su vértice se encuentra por debajo del eje X. En los demás casos, se pueden conocer  $p$  y  $q$  mediante las expresiones:

Ecuación 9. Intersecciones en el eje X de la parábola

$$p = \frac{(-b + D^{\frac{1}{2}})}{2a}, q = \frac{(-b - D^{\frac{1}{2}})}{2a}$$

Aplicaciones a la curva medioambiental de Kuznets

Ciertamente, la fórmula para la coordenada  $h$  del vértice en el eje X de la ecuación 7, es la que se ha encontrado en la derivación parcial de la ecuación, y es propia de los elementos fundamentales de una función cuadrática, en otras palabras, el punto de inflexión de la CAK, es, estrictamente el vértice de la parábola. Sin embargo, la literatura de la CAK solo ha promovido el cálculo de uno de sus elementos, la coordenada del punto de inflexión en X con el objetivo de determinar el nivel de PIB per cápita en el cuál las emisiones de empezaran a disminuir, y han dejado de lado el cálculo de la coordenada en Y.

Ahora bien, alguien podría argumentar que, el hecho de que se calculara o no se calculara la coordenada Y del punto de inflexión, su resultado no cambiaría en nada el valor de la

coordenada en X, es decir, no se modificaría en nada el nivel del PIB de inflexión, esto cierto, sin embargo, el conocer el valor de Y permitiría localizar de manera precisa el vértice en la curva “confirmada”.

Mejor aún, si realmente es cierto que la relación encontrada es una  $\cap$  o una U, a partir de los coeficientes obtenidos y aplicando las propiedades matemáticas de la función cuadrática no solamente se podría ubicar el vértice de la curva, también se podrían conocer las intersecciones en el eje X (siempre que la parábola corte al eje) lo que permitirá trazar la parábola correspondiente en el plano cartesiano y de este modo confirmar dos de los posibles resultados de la CAK ( $\cap$  o U) de manera estricta por medio de su ajuste a la parábola trazada en el plano cartesiano.

#### 6.6.2 Propiedades aplicadas a la CAK

Pues bien, veamos qué pasa cuando se busca comprobar que la relación encontrada mediante ARDL de límites y MCO de la forma tradicional, es en efecto, una forma de U. Aplicando las formulaciones anteriormente descritas a la terminología de la CAK tendríamos las siguientes expresiones, pero antes, es importante recordar que este trabajo prueba la CAK para las emisiones de CO<sub>2</sub>. En los años recientes debido a la importancia que tiene el estudio del CO<sub>2</sub> en de manera individual, se ha utilizado el término curva de carbono de Kuznets (CCK o CKC por sus siglas en inglés) específicamente para los estudios de CO<sub>2</sub> (Liddle, 2015).

En este sentido las re-expresiones matemáticas aplicadas a continuación toman el término CCK para señalar la aplicación a las emisiones de CO<sub>2</sub>, sin embargo, estas expresiones pueden ser aplicables a otros indicadores ambientales. Comenzamos con la expresión general de la forma reducida de la CCK:

Ecuación 10. Forma de reducida de la curva de carbono de Kuznets (CCK).

$$CO_2 = f(PIB) = \beta_2 PIB^2 + \beta_1 PIB + \beta_0$$

Dónde:  $CO_2$  y  $PIB$  son las emisiones de  $CO_2$  y el Producto Interno Bruto respectivamente en términos per cápita,  $\beta_2$  es el coeficiente del término cuadrático,  $\beta_1$  es el coeficiente del término lineal y  $\beta_0$  es el término constante función cuadrática.

Para calcular entonces el punto de inflexión tanto a niveles de  $PIB$  como de  $CO_2$ , la expresión a resolver sería:

Ecuación 11. Picck, punto de inflexión de la curva de carbono de Kuznets

$$Picck \left( PIB^* = -\frac{\beta_1}{2\beta_2}, \quad CO_2^* = f\left(-\frac{\beta_1}{\beta_2}\right) \right)$$

Dónde  $Picck$  es el punto de inflexión de la curva de carbono de Kuznets con coordenadas  $(PIB^*, CO_2^*)$  que representan los nivel de  $PIB$  y  $CO_2$  de inflexión respectivamente. Para graficar la parábola en el plano cartesiano, se deben resolver las siguientes expresiones que permiten encontrar las intersecciones en el eje del  $PIB$ :

Ecuación 12. Discriminante de la CCK

$$D = \beta_1^2 - 4\beta_2\beta_0$$

Donde  $D$  es el discriminante de la CCK.

Ecuación 13. Intersecciones de la CCK en eje del  $PIB$

$$PIBa = \frac{(-\beta_1 + D^{\frac{1}{2}})}{2\beta_2}, \quad PIBz = \frac{(-\beta_1 - D^{\frac{1}{2}})}{2\beta_2}$$

Dónde  $PIBa$  y  $PIBz$  son las intersecciones de la CCK. Es importante notar que si la parábola encontrada tiene concavidad negativa (forma de U invertida) y ambas intersecciones cortan



al eje del PIB en el primer cuadrante,  $PIBz$  será la intersección más alejada al origen (esta anotación tendrá utilidad más adelante). Las demás literales son las que ya se han descrito.

Ahora, con las expresiones anteriores, se busca validar gráficamente que existe una relación en forma de U para el caso de la economía mexicana. Comenzamos con el cálculo del  $Picck$  de la parábola sugerida con los coeficientes de la tabla 10. La fórmula  $f(x)$  del vértice indica que se debe sustituir el valor encontrado del  $PIB^*$  en la forma general de la función cuadrática (ecuación 10) considerando los coeficientes obtenidos, la operación quedaría como:

Datos del modelo ARDL (tabla 10):  $B2 = 0.7177$ ,  $B1 = -13.8114$ , y  $B0 = ?$

$$Picck = PIB^* = -\frac{-13.8114}{2 * 0.7177} = 9.6219$$

Ahora bien, el resultado anterior se sustituye en la función  $CO2$ , si consideramos una constante 0 (¿es correcto considerar una constante 0?), entonces el punto más bajo de  $CO2$  estaría en:

$$Picck = CO2^* = f(9.6219) = (0.7177 * 9.6219^2) + (-13.8114 * 9.6219) + 0 = -66.4465$$

Con este resultado, se tendría entonces que las coordenadas del punto de inflexión de la CCK son: (9.6219, -66.4465). Resolviendo los demás elementos para encontrar las intersecciones en el eje del PIB, tendríamos:

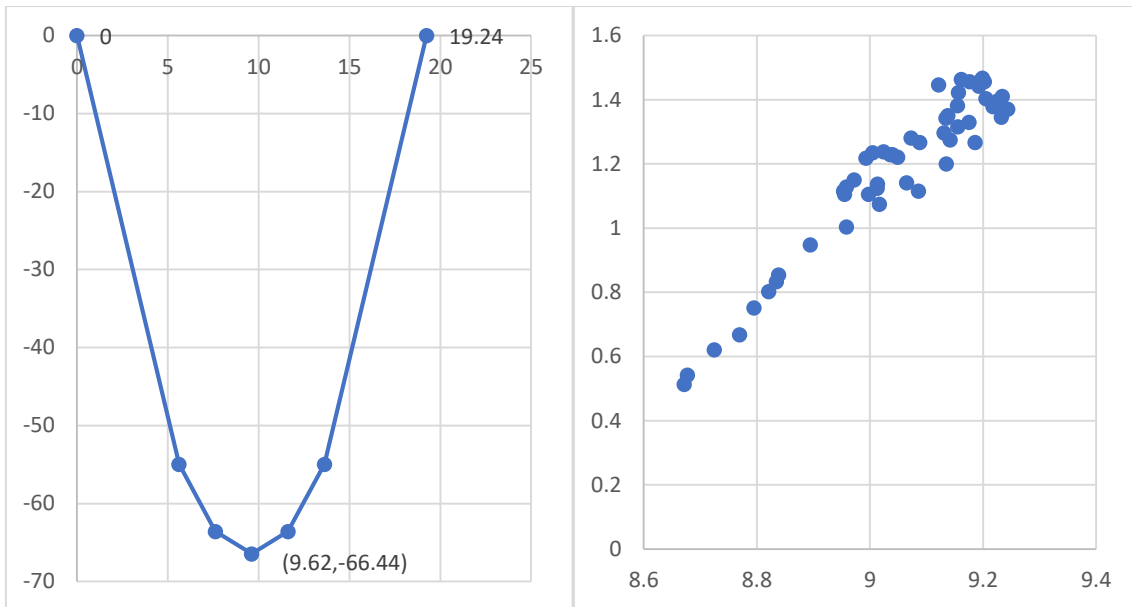
$$D = -13.8114^2 - (4 * 0.7177 * 0) = 190.7547$$

$$PIBa = \frac{(-(-13.8114) + 190.7547^{\frac{1}{2}})}{2 * 0.7177} = 19.2439$$

$$PIBz = \frac{(-(-13.8114) - 190.7547^{\frac{1}{2}})}{2 * 0.7177} = 0$$

Graficando los resultados del vértice y los puntos de intersección en PIB, la parábola obtenida se presenta en la figura 16 lado izquierdo, en el lado derecho se grafican las observaciones reales del estudio de la relación CO2-PIB (la escala es logarítmica debido a la transformación de las variables).

Figura 16. Gráfica de la CCK con ARDL de límites vs relación CO2-PIB.



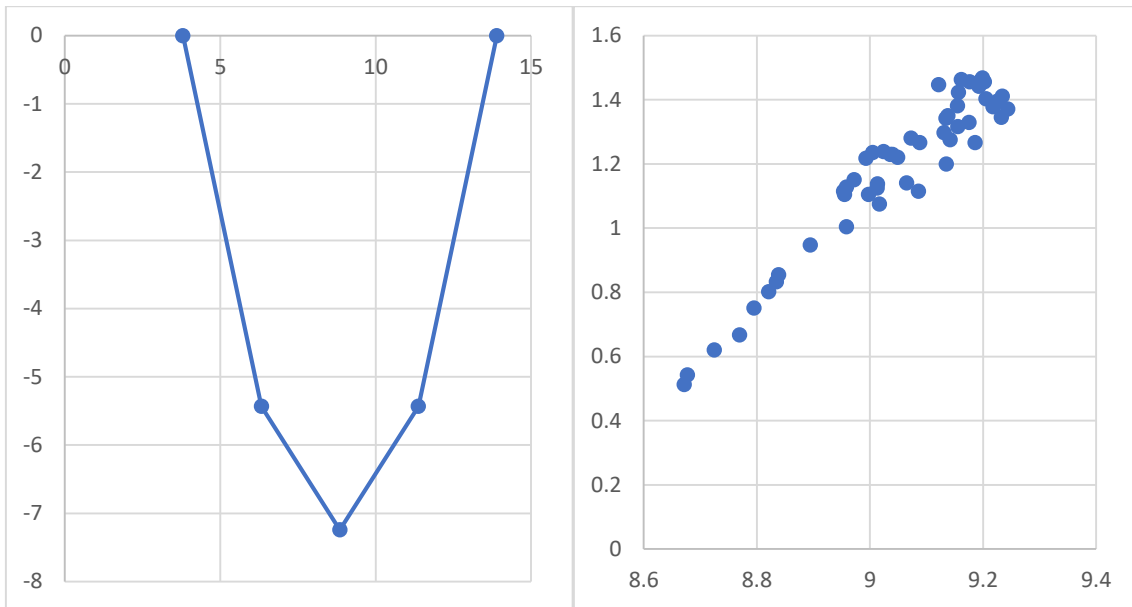
Fuente: Elaboración propia

¿En qué momento los coeficientes obtenidos trazan una parábola que ajusta a las observaciones reales de la muestra? La respuesta es evidente: en ningún momento. Grafiquemos ahora con los coeficientes del MCO, tabla 11, que “confirmó” la relación en forma de U. Aplicando las mismas operaciones con los coeficientes de la tabla 11,  $B_2 = 0.2840$ ,  $B_1 = -5.0261$  y  $B_0 = 14.9954$ . Los resultados serían:

$$\text{PIB}^* = 8.8487, \text{CO}_2^* = -7.2419, D = 8.2269 \text{ PIB}_a = 13.8985 \text{ PIB}_z = 3.7990$$

Los resultados gráficos se muestran en la figura 17.

Figura 17. Gráfica de la CCK con MCO de confirmación vs relación CO2-PIB.



Fuente: elaboración propia

Es evidente que la curva trazada a partir de los datos el MCO de confirmación tampoco ajusta al comportamiento de los datos observados.

### 6.6.3 ¿Por qué las parábolas del ARDL de límites o el MCO no siguen la relación CO2-PIB?

¿Por qué si los coeficientes obtenidos son significativos tanto por ARDL de límites como MCO no ajustan a la relación observada?

La razón es que los coeficientes no fueron obtenidos en una forma pura de la relación CO2-PIB y por el contrario se encuentran influidos por la presencia de otras variables explicativas, por lo tanto, no deberían ser usados para “validar o rechazar” dos de las posibles formas empíricas de la CAK como tradicionalmente se ha realizado. ¿A qué nos referimos con “influidos por la presencia de otras variables”? Recordemos brevemente como son obtenidos los coeficientes en una regresión y ejemplifiquemos con el mismo MCO



¿Cuál es la novedad si son los mismos resultados de la tabla 11? Lo que buscamos mostrar no es un resultado diferente, lo que se demuestra aquí es que cada valor del vector de coeficientes al ser obtenido por un producto matricial, en el proceso de multiplicación de las matrices anteriores, el resultado está condicionado a los valores de filas y columnas incluidos. En este sentido el valor de los coeficientes cuadrático, lineal y la constante están totalmente influidos por los valores de las demás variables explicativas y la variable *duumy*.

En conclusión, al buscar comprobar la hipótesis de la CAK o la CCK únicamente a través de coeficientes del PIB y sus signos, obtenidos con metodologías que sigan un proceso similar al MCO o el mismo del MCO, habrá que tener en cuenta que los resultados finales no serían puramente los de una función cuadrática. Si esto es así, al buscar la comprobación gráfica con las propiedades estrictas de la parábola no habrá tal certeza gráfica ni respaldo matemático puro que permita afirmar o rechazar, a partir de estos coeficientes obtenidos, la existencia de una relación en forma de U normal o invertida.

Lo anterior queda demostrado al graficar las parábolas con los coeficientes obtenidos mediante la aplicación tradicional del ARDL de límites y los obtenidos por MCO, el problema sobre que constante utilizar en el cálculo de los elementos de la parábola o suponer que la constante es cero pasa a menor gravedad, en realidad el valor de la constante es el mismo que el de los términos lineal y cuadrático, cualquiera que hubiera sido la constante, esta también habría sido influida por el mismo proceso que arrojó los demás coeficientes.

#### 6.6.4 Aplicación a la forma reducida de la CCK y modelación por ARDL sin término cuadrático

¿Qué se propone?

Si lo que se busca es probar de manera estricta una forma de U inversa o normal, el procedimiento más limpio, sería a partir de la forma reducida de la CCK, es decir, realizar la estimación a partir del modelo especificado en la ecuación 10:

$$CO2 = f(PIB) = \beta_2 PIB^2 + \beta_1 PIB + \beta_0$$

Esta forma, además de conservar, los coeficientes puros, permitiría hacer uso de las propiedades de la función general cuadrática. Por lo tanto, los pasos son:

1. Obtener por MCO los coeficientes del PIB en forma reducida en el contexto de la CCK mediante la ecuación 10. Los resultados de esta estimación se presentan en la tabla 12, con series modeladas en logaritmos naturales.

Tabla 12. Resultados MCO en forma reducida

Variable	Coeficiente	Estadístico t	Probabilidad
LNPIB	27.0289	4.3091	0.0001
LNPIB2	-1.4165	-4.0592	0.0002
C	-127.3761	-4.5202	0.0000
R <sup>2</sup>	0.9390		
R <sup>2</sup> ajustado	0.9366		

Fuente: Elaboración propia

Una vez que se haya comprobado que la forma es una U normal o invertida a partir del signo de los coeficientes y su nivel de significancia, en este caso, ahora la relación que se encuentra es una U invertida dados los coeficientes B2 = -1.4165 B1= 27.0289 y B0 = -127.3761, todos significativos al 1%. Este resultado indica por lo tanto que existe un punto de inflexión válido que podría ser interpretado.

En este sentido, el paso siguiente, será el cálculo del *Picck*, el discriminante *D*, el *PIBa* y el *PIBz*, necesarios para trazar la parábola correspondiente en el plano cartesiano e interpretar los resultados.

2. Calculo del *Picck*, discriminante *D*, *PIBa* y *PIBz*.

$$Picck = PIB^* = -\frac{27.0289}{2 * -1.4165} = 9.5407$$

$$Picck = CO2^* = f(9.5407) = (-1.4165 * 9.5407^2) + (27.0289 * 9.5407) - 127.3761$$

$$= 1.5616$$

$$D = 27.0289^2 - (4 * -1.4165 * -127.3761) = 8.8484$$

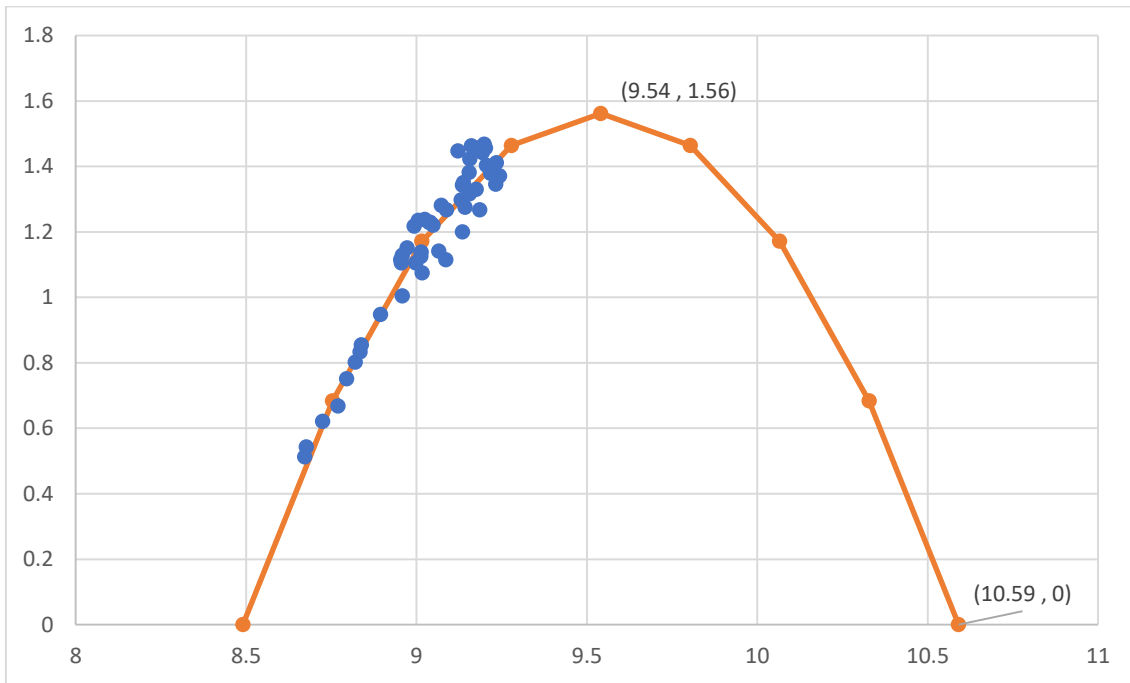
$$PIBa = \frac{-(27.0289) + 8.8484^{\frac{1}{2}}}{2 * -1.4165} = 8.4907$$

$$PIBz = \frac{-(27.0289) - 8.8484^{\frac{1}{2}}}{2 * -1.4165} = 10.5907$$

A partir de los resultados anteriores el siguiente paso es graficar la parábola de la CCK e interpretar los resultados.

3. Graficar e interpretar los resultados. En este punto además de graficar la parábola CCK también se puede incluir en el mismo gráfico las observaciones reales y notar en qué medida los datos siguen la forma de U invertida. La figura 18 muestra este paso.

Figura 18. Curva CCK estimada vs relación observada CO2-PIB



Fuente: Elaboración propia

La figura 18, presenta un hallazgo revelador, si únicamente se tomaran los coeficientes de la tabla 8, se podría inferir que la relación CCK hallada es una U invertida, sin embargo, al incluir las observaciones reales de la relación CO2-PIB en la trayectoria de la parábola, es evidente que la economía mexicana que encuentra en la fase escala teorizada por la literatura de la CAK y que aún no se ha alcanzado el punto de inflexión de las emisiones con respecto al nivel ingresos.

La conclusión es entonces que la economía mexicana muestra un ajuste cuadrático correspondiente a una parábola de concavidad negativa (U invertida), sin embargo, el ajuste gráfico revela que relación CO2-PIB de México se encuentra en la fase escala en el contexto teórico de la CAK. Por lo tanto, hasta alcanzar el punto de inflexión, *ceteris paribus*, habrá mayores emisiones de CO2 para mayores niveles de ingreso. ¿A qué niveles se alcanza el punto de inflexión?



De acuerdo con los valores obtenidos el punto de inflexión se presentará a un nivel para el PIB per cápita de 9.5407 y a un nivel de CO2 por habitante de 1.5616, dado que estos valores se encuentran en logaritmos naturales el siguiente paso es la conversión a sus valores originales y de esta manera hacer la interpretación en términos económicos. Un elemento adicional que se puede interpretar de los cálculos anteriores es el punto PIBz, que en términos económicos estaría indicando el punto de cero emisiones de CO2 con respecto al PIB y del que también podría calcularse, al igual que en el punto de inflexión, el tiempo en que ocurrirá.

4. Conversión económica. Debido a que los resultados anteriores se presentan en logaritmos naturales, en este paso, se realiza la conversión a sus valores originales mediante su operación inversa, la cual consiste en elevar el número  $e$  a la potencia indicada por el logaritmo natural. Así, la conversión a los valores originales queda:

Para el nivel de PIB per cápita en dólares:

$$PIB^* = e^{9.5407}$$

$$PIB^* = 13\,914.6845$$

Para el nivel del CO2 en toneladas por habitante:

$$CO2^* = e^{1.5616}$$

$$CO2^* = 4.7664 \text{ toneladas}$$

Para nivel de PIB per cápita en el que las emisiones llegan a cero:

$$PIBz = e^{10.5907}$$

$$PIBz = 39\,763.3137$$

Dados estos resultados se revela entonces que el nivel de PIB per cápita en el cual las emisiones de CO2 por habitante empezarán a disminuir, será a 13 914.68 dólares y que el nivel máximo de emisiones que cabría esperar es de 4.76 toneladas por habitante. En el caso de las cero emisiones de CO2 por habitante, estas se alcanzarían a nivel de 39 763.31 dólares de PIB per cápita. ¿En qué tiempo se alcanzará estos resultados? En el siguiente paso se responde esta pregunta

##### 5. Cálculo del año de inflexión y del año de cero emisiones de CO2.

Dado que se busca conocer el tiempo con el cual se llega a un valor de PIB futuro dado un valor presente de PIB que crece a una tasa constante, se podría formular la siguiente expresión:

$$PIB_f = PIB_i(1 + g)^t$$

Dónde,  $PIB_f$  es el valor futuro conocido (puede ser el PIB de inflexión o el PIB de cero emisiones),  $PIB_i$  es el valor actual de PIB en la muestra (es decir el último valor de la serie conocido),  $g$  es una tasa de crecimiento constante del PIB en el tiempo y  $t$  es el tiempo que se desea conocer.

De la ecuación anterior, despejando para  $t$ , se obtendría la formula final:

$$\frac{PIB_f}{PIB_i} = (1 + g)^t$$

$$\ln\left(\frac{PIB_f}{PIB_i}\right) = t \ln(1 + g)$$

Ecuación 15. Tiempo para un PIB futuro

$$t = \frac{\ln\left(\frac{PIB_f}{PIB_i}\right)}{\ln(1 + g)}$$

Aplicando la ecuación 15 al PIB de inflexión ( $PIB^*$ ), dado el valor actual del PIB en el año 2022 de 10 077.38 ( $PIB_i$ ) y una tasa de crecimiento ( $g$ ) también del último año de 3.35%, el tiempo en el que se alcanzaría el punto de inflexión se calcularía como:

$$t = \frac{\ln\left(\frac{PIB^*}{PIB_i}\right)}{\ln(1 + g)}$$

$$t = \frac{\ln\left(\frac{13\ 914.68}{10\ 077.38}\right)}{\ln(1 + 0.0325)}$$

$$t = 10.09792221$$

El tiempo a partir del presente (2022) en que se alcanzaría el PIB de inflexión es de 10.09 años, o bien, el punto de inflexión de las emisiones de CO2 ocurriría en el año 2032.

Aplicando la misma fórmula, pero ahora con el nivel de PIB de 39 763.3137 para conocer el año de carbono cero, el cálculo quedaría como:

$$t_z = t = \frac{\ln\left(\frac{39\ 763.3137}{10\ 077.38}\right)}{\ln(1 + 0.0325)}$$

$$t_z = 42.95583294$$

De este modo, el tiempo en que se llegará a las cero emisiones de CO2 es de 42.95 años, o bien, en noviembre de 2064. Como se revisó en literatura teórica, una crítica a la forma reducida de la CAK es que no permitía evaluar de manera conjunta otras variables relacionadas con la degradación ambiental, ante esta crítica, se propone utilizar el modelo ARDL de límites con la diferencia ahora, que el término cuadrático no será necesario de incluirlo debido a que ya se ha confirmado la forma empírica de la relación.

Estimar nuevamente las relaciones de largo plazo sin la presencia del término cuadrático del PIB es el último paso del ajuste propuesto. De aquí en adelante, los pasos adicionales son los tradicionales de la metodología ARDL de límites.

6. Estimación de la dinámica de largo plazo por medio del ARDL con prueba de límites.

La tabla 13, presenta los nuevos resultados de la estimación del ECM no restringido, es importante señalar que, al no incluir el término cuadrado del PIB, el modelo mejora sus propiedades estadísticas al no presentar desde el inicio problemas de normalidad, Autocorrelación, Heterocedasticidad o especificación sin la necesidad de incluir variables *dummy*. Es decir, se presenta un modelo más “limpio” en cuanto a los supuestos básicos de regresión.

Tabla 13. Resultados UECML sin PIB cuadrático

Variable	Coefficiente	Estadístico t	Probabilidad
C	-0.5188	-0.9174	0.3644
TCE	-0.2003	-2.7367	0.0092
LNPIB(-1)	-0.1348	-4.0718	0.0002
LNIED(-1)	0.0166	4.6684	0.0000
LNCE(-1)	0.1975	3.0812	0.0037
LNCER(-1)	0.0027	0.2452	0.8075
D(LNPIB)	0.0151	0.3211	0.7498
D(LNPIB(-1))	0.0575	1.8711	0.0687
D(LNIED)	0.0001	0.0618	0.9510
D(LNCE)	1.0480	25.7809	0.0000
D(LNCER)	-0.0195	-2.0177	0.0504
R <sup>2</sup>	0.9992		
R <sup>2</sup> ajustado	0.9990		
Normalidad (JB)			0.6571
Correlación serial (LM)			0.3747
Heterocedasticidad (BPG)			0.3886
Especificación (Ramsey RESET)			0.4701

Fuente: Elaboración propia

El modelo UECM no restringido de la tabla 13, como se apuntaba, supera las pruebas JB, LM, BPG y Ramsey RESET que indican normalidad, no Autocorrelación, homocedasticidad y especificación adecuada. La bondad de ajuste del modelo, medida por el  $R^2$  y  $R^2$  ajustado determina que los cambios de la variable dependiente son explicadas en un 99% por las variaciones de los regresores seleccionados. En cuanto al TCE, éste presenta un coeficiente negativo y significativo al 1% de -0.2003 lo que señala una velocidad de ajuste de 0.2003 unidades por periodo del corto al largo plazo. Como sabemos, del modelo ECM no restringido antes de interpretar los coeficientes de corto como de largo plazo, primer se sugiere realizar la prueba de límites para contrastar la hipótesis nula de no cointegración y posteriormente analizar los coeficientes. Los resultados de la prueba se presentan en la tabla 14.

Tabla 14. Resultados de la prueba límites sin PIB cuadrático

Prueba de límites ( <i>bound test</i> )		H0: No cointegración		H1: Cointegración	
Estadística de prueba	Valor	Significancia	I(0)	I(1)	
Asintótica: n=1000					
Estadístico F	7.378164	10%	2.45	3.52	Sí
Grados de libertad	4	5%	2.86	4.01	Sí
Pesaran et al. (2001)		2.5%	3.25	4.49	Sí
		1%	3.74	5.06	Sí
Muestra finita n=55					
Muestra actual	51				Sí
Narayan (2005)		10%	2.578	3.71	Sí
		5%	3.068	4.334	Sí
		1%	4.244	5.726	Sí

Fuente: Elaboración propia

El valor del estadístico F arrojado por la prueba de límites es de 7.3781 el cual está por encima de los límites superiores críticos al 1% de significancia tanto de los valores

propuestos por Pesaran et al. (2001) y por Narayan (2005). Por lo tanto, se comprueba una relación de largo plazo entre las variables del modelo. Comprobada la relación cointegrante, se estiman los coeficientes de largo plazo, estos resultados se presentan en la tabla 15.

Tabla 15. Coeficientes de largo plazo sin PIB cuadrático

Variable	Coefficiente	Estadístico t	Probabilidad
LNPIB	-0.6728	-2.1019	0.0419
LNIED	0.0828	3.3473	0.0018
LNCE	0.9857	11.267	0.0000
LNCER	0.0139	0.2301	0.8192

Fuente: Elaboración propia

En los resultados de largo plazo se muestra que, la variable LNPIB tiene un coeficiente negativo y significativo al 5% (valor p 0.0419) de -0.6728, lo cual indica que en el efecto global de largo plazo, por cada 1% de incremento en el PIB per cápita las emisiones de CO2 por habitante disminuirán en 0.6728%.

En cuanto a la variable LNIED se obtiene un coeficiente positivo y significativo al 1% (valor p 0.0018) de 0.0828, lo que indica que por cada incremento de 1% en la inversión extranjera directa las emisiones de CO2 aumentarán en 0.0828%, este resultado confirma nuevamente la hipótesis del paraíso de contaminación en México, pero dado el valor del coeficiente una vez más se confirma la PHH de manera débil. Para la variable LNCE se obtuvo un coeficiente positivo y significativo al 1% (valor p 0.0000) de 0.9857, que señala que por cada incremento de 1% en el consumo de energía de origen fósil las emisiones de CO2 incrementaran en 0.9857%. Cabe resaltar que el impacto de consumo de energía fósil, es más grande que el impacto del PIB términos absolutos, lo que comprobaría que realidad la variable clave a seguir en relación con las emisiones de CO2 es el consumo de energía más que el crecimiento económico.

En contraste, la variable LNCER muestra un signo positivo pero no significativo a ningún nivel de confianza, lo que comprueba que el consumo de energía de fuentes renovables en México todavía no muestran un impacto de mitigación en las emisiones de CO<sub>2</sub>, es más, el resultado sugiere una investigación más profunda para esclarecer el impacto de las energías renovables en las emisiones mexicanas. Después de interpretar los coeficientes de largo plazo, la tabla 16 presenta ahora los coeficientes de corto plazo y el término de corrección de error.

Tabla 16. Coeficientes de corto plazo modelo ARDL sin PIB cuadrático

Variable	Coeficiente	Estadístico t	Probabilidad
C	-0.5188	-6.3757	0.0000
D(LNPIB)	0.0151	0.3650	0.7170
D(LNPIB(-1))	0.0575	1.9809	0.0545
D(LNIED)	0.0001	0.0691	0.9452
D(LNCE)	1.0480	30.5537	0.0000
D(LNCER)	-0.0195	-2.8044	0.0077
TCE	-0.2003	-6.3702	0.0000

Fuente: Elaboración propia

La dinámica de corto plazo señala que el PIB tiene un impacto positivo y significativo al 10% en su primer rezago de 0.0545% sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> por cada 1% de incremento, es interesante notar que este rezago capturaría el desfase notado en la evaluación gráfica de las series temporales. Otra observación interesante es también que, al obtener un coeficiente positivo y significativo en el corto plazo y un coeficiente negativo y significativo en el largo plazo, se confirmaría el ajuste cuadrático correspondiente a una curva medioambiental de Kuznets en forma de U invertida. Ahora sabemos que esta confirmación no necesariamente implica que la curva ya se haya formado por las observaciones reales.

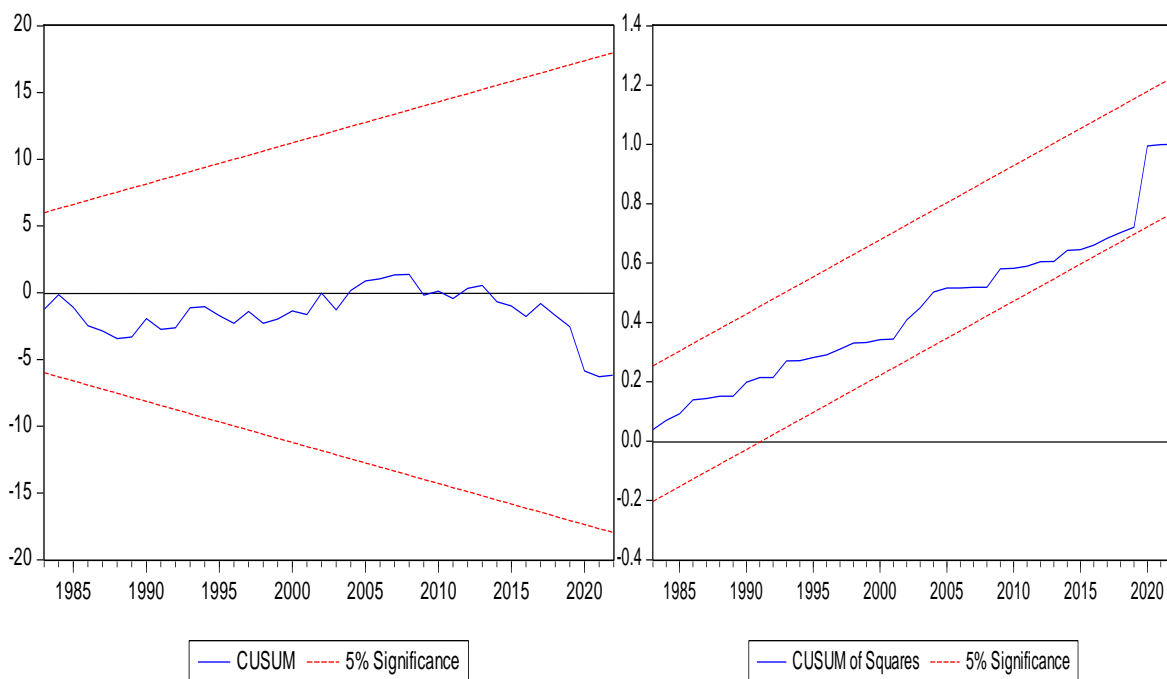
El impacto de la IED por su cuenta, aunque es positivo y nuevamente con un coeficiente muy bajo de 0.0001 no es significativo en el corto plazo. En el mismo sentido el consumo de energía de origen fósil tiene un impacto positivo y significativo (al 1%) en el corto plazo de 1.04% por cada 1% de incremento en el consumo de este tipo de energía. Se confirma nuevamente en el corto plazo que la energía fósil en términos absolutos tiene un impacto mayor en las emisiones de CO<sub>2</sub> que el crecimiento económico.

En contraste el consumo de energía de fuentes renovables muestra un impacto negativo y significativo de -0.0195 en el corto plazo (a un nivel de confianza del 1%). Lo que indica que por cada 1% de incremento en el uso de energía de fuentes renovables las emisiones de CO<sub>2</sub> disminuirán en 0.0195% en el corto plazo. Este resultado es el esperado en la literatura de la CAK, pero tiene un efecto relativamente bajo en comparación con el consumo de energía fósil reforzando la ambigüedad del papel de las energías renovables en las emisiones de CO<sub>2</sub> para el caso de México.

Finalmente, los gráficos CUSUM y CUSUMQ comprueban la estabilidad de los coeficientes a lo largo del tiempo para el modelo ARDL de límites estimado.



Figura 19. CUSUM y CUSUMQ de coeficientes de largo plazo sin PIB cuadrático



Fuente: Elaboración propia

#### 6.6.5 Discusión en torno a otros trabajos empíricos

A partir del ajuste metodológico realizado, los resultados de esta investigación son consistentes con los hallazgos de Hossain et al. (2022) quienes probaron la CAK examinando la relación entre la huella ecológica y el agotamiento de los recursos naturales, el crecimiento económico, el consumo de energía y la inversión extranjera directa en la economía mexicana. Los resultados de su prueba de límites ARDL corroboran la presencia de una asociación de largo plazo entre las variables, no validando la hipótesis de la curva ambiental de Kuznets implicando que la economía de México permanece en la etapa de escala, a la vez que, confirman la Hipótesis del Refugio de Contaminación ya que la inversión extranjera directa deteriora la calidad ambiental a corto y largo plazo.

Por otro lado, los resultados de este trabajo difieren de los de Jahanger, Zubair Chishti, et al. (2022), quienes investigaron los efectos heterogéneos de la energía renovable y la

globalización a diferentes niveles de dióxido de carbono. Sus resultados son opuestos ya que muestran que las energías renovables mitigan las emisiones de CO<sub>2</sub> independientemente del nivel cuantílico y que el PIB y el PIB al cuadrado causan las emisiones sólo a largo plazo confirmando la existencia de la hipótesis CAK para México.

En relación con el estudio Gómez et al. (2024) nuestros resultados son parcialmente opuestos ya que encontraron que el CO<sub>2</sub> tiene una relación positiva con la IED, el PIB y la apertura comercial implicando que un aumento en cualquiera de estas variables provocará que aumenten las emisiones, generando mayor degradación ambiental. Así mismo también diferimos sobre la existencia de una relación negativa entre el uso de energías renovables y las emisiones.

En cuanto al estudio de Mahmood (2023), Gómez & Rodríguez (2020) y Marín-Leyva et al. (2022) los resultados no son directamente comparables con los del presente trabajo. La principal razón es que las conclusiones de los trabajos previamente citados, se obtuvieron a partir de la examinación de grupos de países, es decir, por regiones.

Sin embargo, tomando en cuenta esa consideración, los resultados son parcialmente consistentes con el de Mahmood (2023) que valida la CAK en su primera etapa y la PHH por medio de las exportaciones con un impacto positivo en las emisiones de CO<sub>2</sub> de los países de origen y vecinos y contaminan toda la región. Son opuestos al de Gómez & Rodríguez (2020) que muestra que las energías renovables reducen la degradación del medio ambiente y valida la curva de Kuznets medioambiental. Y por último, parcialmente en concordancia con los resultados Marín-Leyva et al. (2022) que muestran una trayectoria en forma de U invertida entre el desarrollo económico y la contaminación ambiental, una relación negativa entre CO<sub>2</sub> y consumo de energía renovable y, una relación positiva entre CO<sub>2</sub> y consumo de energía fósil.

## Conclusiones, implicaciones y recomendaciones

### Conclusiones

El objetivo principal de la presente tesis fue determinar cual es la relación existente entre la degradación ambiental por CO<sub>2</sub> y el crecimiento económico en México en presencia de la inversión extranjera directa, el consumo de energía y el consumo de la energía renovable, para este fin, se propuso un modelo econométrico de series de tiempo anuales con las emisiones de CO<sub>2</sub> como variable dependiente y el PIB per cápita (lineal y cuadrático), la inversión extranjera directa, el consumo de energía y el consumo de energía renovable durante el periodo de 1970 a 2022.

Mediante este conjunto de observaciones, se modeló la relación planteada a través de la técnica ARDL con prueba de cointegración de límites, sin embargo, el proceso reveló que esta metodología como ha sido aplicada hasta ahora para el caso de la CAK, genera valores y signos de coeficientes que estiman parábolas con comportamientos diferentes a la relación observada entre las emisiones de CO<sub>2</sub> y el crecimiento económico.

Lo anterior tiene su origen en el mismo proceso matricial que matemáticamente genera el vector de coeficientes dependiendo cada valor introducido. Para demostrarlo, se tomaron los resultados de los coeficientes del PIB, tanto lineal como cuadrático, obtenidos con la metodología ARDL de límites en presencia de las demás variables de interés (IED, CE y CER), se trazó la parábola estimada a partir de estos coeficientes y se comparó con los datos observados de la relación CO<sub>2</sub>-PIB en un gráfico de dispersión.

Tanto en el caso de la metodología ARDL aplicada tradicionalmente como en el caso de coeficientes obtenidos por un modelo clásico de MCO (incluyendo también las demás variables de interés), las parábolas estimadas no se ajustaron al comportamiento observado de la relación CO<sub>2</sub>-PIB, por el contrario, se observó que las estimaciones fueron en gran

medida opuestas a la relación observada. Por esta razón, se determinó que el modelo más adecuado para la estimación fue el de mínimos cuadrados ordinarios con la forma reducida de la CAK.

Los resultados de este modelo arrojaron un signo positivo y significativo del PIB per cápita en su término lineal y un signo negativo y significativo del término cuadrático, lo que revela un ajuste cuadrático con respecto a una forma de U invertida entre la degradación ambiental por CO<sub>2</sub> y el crecimiento económico en México, sin embargo, la economía mexicana todavía se encuentra en la fase dominada por el efecto escala debido a que no se ha superado el punto de inflexión de la curva, el cual se estimó en \$13 914.68 dólares de PIB y 4.76 toneladas de CO<sub>2</sub> (ambos en términos per cápitas), el nivel de PIB per cápita más reciente del estudio, fue de \$10 077.38 dólares (año 2022) y el más alto fue \$10 343.35 (año 2018).

Considerado el PIB de inflexión como un valor futuro que es alcanzando desde un valor presente a tasa de crecimiento constante (3.25% anual), el punto de inflexión se alcanzaría en 10.09 años, es decir, en el 2032. Del mismo modo, realizando estimaciones para el punto de cero emisiones de CO<sub>2</sub>, éste se encontraría a un nivel de PIB per cápita de \$39 763.31, el cuál, dada la misma tasa de crecimiento se alcanzaría en 42.95 años, es decir, para finales del 2064.

En cuanto al objetivo específico de evaluar la trayectoria de largo plazo de las emisiones de CO<sub>2</sub> en presencia de variables estratégicas para México, la relación se comprobó por medio de la metodología ARDL con prueba de límites para cointegración, señalando en efecto, la existencia de una relación de largo plazo entre la variable dependiente emisiones de CO<sub>2</sub> y las independientes, crecimiento económico, inversión extranjera directa, consumo de energía y consumo de energía renovable.

Los resultados de la metodología anterior mostraron que, en términos per cápita, las emisiones de CO<sub>2</sub> disminuirán 0.67% por cada incremento de 1% del Producto Interno Bruto, aumentarán 0.08% por cada incremento de 1% de la inversión extranjera directa; este resultado confirma débilmente la hipótesis del paraíso de contaminación debido al bajo coeficiente mostrado; aumentarán 0.98% por cada incremento de 1% del consumo de energía fósil y que el consumo de energía renovable no tiene un impacto significativo sobre las emisiones de CO<sub>2</sub>.

### **Implicaciones para el crecimiento económico y la mitigación de GEI**

Los principales hallazgos de este estudio, revelan que, en el corto y en el mediano plazo las emisiones de dióxido de carbono seguirán aumentando como consecuencia de un mayor crecimiento económico debido a que el punto de inflexión entre estas variables está por alcanzarse, en este sentido, las variables de estudio, inversión extranjera directa y consumo de energía tanto fósil como renovable, indican una clara relevancia primero hacia el objetivo de la desvinculación de las emisiones respecto del crecimiento y posteriormente hacia la meta de cero emisiones.

Especialmente, en el caso de la energía fósil, los resultados sustentan, que es el factor que directamente tiene el mayor impacto sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> y no así el crecimiento económico por sí mismo. Lo anterior es consistente con la naturaleza del fenómeno estudiado, si se analiza brevemente, las emisiones de gases efecto invernaderos no son una salida natural del proceso económico, es decir, el objetivo del proceso económico no es generar ningún tipo producto que no satisfaga alguna necesidad de los consumidores, por ello, ésta salida se ha conceptualizado por las ciencias económicas como una “externalidad”.

Sin embargo, externalidad o no, naturales o no, las emisiones de GEI son una salida real del proceso económico que tienen la capacidad de influir sobre el sistema climático a escalas regionales y globales (tal como se ha mostrado en el capítulo II). Ahora bien, si los GEI son una salida, ¿en qué momento se convirtieron en una entrada? En este punto, la respuesta puede resultar aun más clara, están contenidos en el suministro de energía que es un factor indispensable del proceso productivo para la generación de los bienes y servicios consumidos por la sociedad.

De manera sencilla, la afirmación anterior puede mostrarse mediante una función de producción agregada que tradicionalmente se presentaría de la siguiente manera:

*Ecuación 16. Función de producción agregada con energía*

$$Q = f(K, L, E)$$

Donde: Q es la producción total del proceso productivo, K es la cantidad de bienes de capital utilizados en el proceso, L es la cantidad de mano obra y E es la cantidad de energía

Sin embargo de acuerdo con Keen et al. (2019), el papel de la energía tiene un papel secundario si es visto con la forma funcional de la ecuación (16) ya que implica que la energía puede añadirse a un proceso de producción independientemente del trabajo y el capital, y que el trabajo y el capital pueden funcionar sin insumos energéticos.

Ninguna de las dos proposiciones es cierta. Añadir energía independientemente del trabajo y el capital a un proceso de producción no produciría producción, sino destrucción: tanto el trabajo como el capital son necesarios, y se utilizan, para aprovechar la energía en sus diversas formas y realizar un trabajo útil. Del mismo modo, tanto el trabajo como el capital necesitan energía para poder funcionar: este principio acuñado en una frase diría: “el trabajo sin energía es un cadáver, mientras que el capital sin energía es una escultura” (Keen et al., 2019, p. 3).

Ahora bien, el autor argumenta que una forma adecuada de establecer el papel de la energía dentro del proceso productivo puede presentarse de siguiente manera:

*Ecuación 17. Función de producción Cobb-Douglas con energía (FPCDE)*

$$Q = f(L(E), K(E))$$

Donde E es la energía utilizada en el proceso productivo que afecta tanto al factor trabajo como al factor capital (los demás elementos son los ya definidos). Esta notación concluye en una función del tipo Cobb-Douglas más específica, pero para las implicaciones que se buscan plantear la función anterior será suficiente. El argumento base es el que sigue.

Según Keen et al. (2019), la forma funcional de la ecuación (17) reconoce ambas cuestiones epistemológicas: la energía no se añade a un proceso de producción independientemente del trabajo y el capital, sino que es canalizada por ellos para realizar un trabajo útil; y si el aporte de energía al trabajo o al capital es cero, entonces el trabajo útil realizado por ellos también es cero. Una vez que tanto el trabajo como el capital se consideran medios para transformar la energía en trabajo útil, las entradas de las funciones L(E) y K(E) son energía, mientras que las salidas son el potencial de trabajo útil (exergía).

Bajo este argumento y dado el resultado de aumento del 0.99% de CO<sub>2</sub> por cada 1% de energía fósil, que muestran a la energía fósil como el determinante principal (y natural también) de las emisiones de CO<sub>2</sub> y el impacto no significativo de las energías renovables sobre las mismas, entonces, para el caso de México en el estado actual de la economía, reducir significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub> implica reducir la cantidad de energía fósil utilizada, pero a su vez, disminuir a la energía fósil implica matemáticamente reducir el crecimiento económico.

¿Qué acciones podrían permitir un mayor crecimiento económico a la vez que se mitigan las emisiones?

De acuerdo con el Balance Nacional de Energía 2023, publicado preliminarmente por la Secretaría de Energía (SENER), tan solo el consumo nacional de energía en México en ese año (2023) alcanzó la cifra de 10,477.17 petajoules (PJ, un petajoule equivale a 278 000 megavatios/hora de electricidad), de los cuales se importaron el 44.60% (4,556.76 PJ) para satisfacer la demanda energética del país, este hecho, abre un canal de gran importancia tanto para el crecimiento económico como para la mitigación de las emisiones de CO2 en México.

### **Recomendaciones**

Frente al desafío de un mayor crecimiento económico a la vez que se mitigan las emisiones de gases de efecto invernadero como el CO2 y tomando como la referencia la actual CDN mexicana, se recomienda a los tomadores de decisiones en materia energética y no energética:

1. Realizar estudios técnicos, financieros y de mercado que permitan evaluar la viabilidad de creación de nuevas unidades de negocios dedicadas a la generación, distribución y venta de energía renovable al mercado nacional y eventualmente al mercado internacional. La creación de nuevas unidades de negocio dedicadas a la venta de energía limpia permitirá dotar gradualmente a los sectores económicos de la energía necesaria para sus actividades económicas a la vez que se disminuyen las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo a la transición de los combustibles fósiles a combustibles más limpios.
2. Establecer nuevas alianzas estratégicas internacionales, en pleno respeto de la soberanía nacional, que fomenten también la producción de energía renovable en el país y que contribuyan a la meta de integrar mayores capacidades de energías limpias, tomando como base los retos superados del Plan Sonora. En este sentido, son cruciales las negociaciones internacionales para que las alianzas además de permitir transferencia de



tecnología, permitan desde una base estratégica, la transferencia de conocimientos que hagan posible el desarrollo de esas tecnologías dentro del país.

3. Fortalecer desde su puesta en marcha, el Sistema de Comercio de Emisiones de México (SCE), que regulará las emisiones de las grandes fuentes industriales en el país y que, mediante instrumentos innovadores buscará establecer un precio del carbono. En este sentido, se recomienda aumentar la accesibilidad también, a pequeños oferentes y demandantes de proyectos de reducción de carbono con el fin de aumentar la competitividad y la innovación del mismo SCE.

4. Debido a que Petróleos Mexicanos ha establecido una meta de aprovechamiento de gas metano del 98%, considerando la producción de campos existentes y nuevos, para lo cual se desarrolla una estrategia de aprovechamiento del gas en pozos existentes y se realizan obras prioritarias en los nuevos desarrollos con la colaboración del gobierno de Estados Unidos, se recomienda, diseñar estrategias específicas respecto al tratamiento y explotación de este gas debido a que es el segundo más abundante en la atmósfera y a su alto potencial de calentamiento global.

5. Consolidar la Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica dirigida a promover primordialmente la transformación en el transporte público, sector considerado como el de mayor impacto social, en esta consolidación es importante tomar en cuenta tanto a las zonas urbanas como a las zonas rurales del país.

6. Realizar estudios técnicos, financieros y mercadológicos para la exploración, explotación, beneficio y aprovechamiento del litio, localizado en el territorio nacional, así como la administración y control de las cadenas de valor económico de dicho mineral. Con ello, se podrá contribuir a la soberanía energética nacional sobre el litio y otros minerales que resulten estratégicos y necesarios para la transición energética, la innovación tecnológica

y el desarrollo del país, haciendo partícipes activos dentro de las cadenas de valor a los pueblos originarios, comunidades indígenas y afroamericanas.

7. Ampliar la Estrategia Nacional de Trabajo Remoto y combinarla con la jornada de laboral de 40 horas que se impulsa de forma colaborativa con industrias y autoridades, contribuyendo en mayor medida a reducir la huella de carbono, así otros contaminantes atmosféricos, lo que fortalecerá tanto las políticas de cambio climático y como las laborales, al tiempo que se puede incrementar productividad de los trabajadores.

8. Incentivar a los negocios de nueva creación intensivos recursos naturales y energía a partir de la transferencia de tecnología y conocimientos que les permitan disminuir la brecha de eficiencia respecto a sus pares más avanzados.

9. Definir los derechos y obligaciones a los agentes económicos sobre la explotación de los recursos naturales sobre la base de justicia económica y justicia social.

10. Ampliar el Programa Sembrando Vida mediante una mayor cantidad de beneficios directos a los campesinos y campesinas a lo largo y ancho del país, fomentando la agroforestería, la siembra intercalada con árboles frutales con acciones agroecológicas, y diversificando la economía de las comunidades que más lo necesitan.

11. Consolidar los Centros de Aprendizaje Campesino, en los que se incremente la capacidad técnica y financiera necesaria en las comunidades para un cambio de paradigma productivo y fortalecimiento del tejido social.

12. Implementar la Estrategia Nacional de Carbono Azul contemplada, en la que se trabaja por la protección los manglares, pastos marinos y marismas nacionales, hoy más que nunca, se debe reconocer la importancia de los sumideros de carbono naturales en el país que actualmente se ven amenazados por actividades económicas no sustentables.

13. Incentivar la investigación, desarrollo e innovación sobre las prácticas agroecológicas y la agricultura de conservación, entre ellas la de nuevos fertilizantes y bioestimulantes. Aquí la disminución de quemas agrícolas y el impulso de sistemas agrosilvopastoriles, así como las medidas para la captura y manejo del biogás de residuos, tales como sistemas de composta, de biodigestión y de tratamiento diario para evitar la generación de gas metano podrán tener un impacto serán de gran importancia.

14. Hacer seguimientos puntuales de los apoyos no financieros y financieros adquiridos para el impulso de la transición energética. El financiamiento de la investigación, desarrollo e innovación en tecnologías limpias en el país, así como la cooperación con otros países en vías de desarrollo y desarrollados en esta materia, puede crear las condiciones necesarias para el aprovechamiento a gran escala de energías renovables.

15. Implementar mayores estrategias de prevención de desastres y medidas de adaptación necesarias para mitigar aquellos efectos del cambio climático que ya son inevitables.

17. Priorizar e incentivar la educación en Ciencia y Tecnología en todos los niveles educativos mediante nuevos programas de becas directas que den como resultado soluciones aplicables a la problemática del cambio climático.

18. Aumentar la consciencia y las soluciones climáticas en todos los niveles educativos aprovechando los planes de estudios que ya se implementan en el sistema educativo mexicano acorde a las condiciones de cada región.

## Referencias

- Acaravci, A., & Ozturk, I. (2010). On the relationship between energy consumption, CO<sub>2</sub> emissions and economic growth in Europe. *Energy*, 35(12), 5412–5420. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.07.009>
- Agarwal, J. P. (1976). *Reflections on foreign investment in natural resources of developing countries* (Working Paper 52). Kiel Working Paper. <https://www.econstor.eu/handle/10419/46806>
- Agras, J., & Chapman, D. (1999). A dynamic approach to the Environmental Kuznets Curve hypothesis. *Ecological Economics*, 28(2), 267–277. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(98\)00040-8](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(98)00040-8)
- Ahmad, M., Khan, Z., Rahman, Z. U., Khattak, S. I., & Khan, Z. U. (2021). Can innovation shocks determine CO<sub>2</sub> emissions (CO<sub>2e</sub>) in the OECD economies? A new perspective. *Economics of Innovation and New Technology*, 30(1), 89–109. <https://doi.org/10.1080/10438599.2019.1684643>
- Ahmad, M., Khattak, S. I., Khan, A., & Rahman, Z. U. (2020). Innovation, foreign direct investment (FDI), and the energy–pollution–growth nexus in OECD region: A simultaneous equation modeling approach. *Environmental and Ecological Statistics*, 27(2), 203–232. <https://doi.org/10.1007/s10651-020-00442-8>
- Ali, W., Abdullah, A., & Azam, M. (2017). Re-visiting the environmental Kuznets curve hypothesis for Malaysia: Fresh evidence from ARDL bounds testing approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 990–1000. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.236>
- Al-Mulali, U., Saboori, B., & Ozturk, I. (2015). Investigating the environmental Kuznets curve hypothesis in Vietnam. *Energy Policy*, 76, 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.11.019>

- An, H., Razzaq, A., Haseeb, M., & Mihardjo, L. W. W. (2021). The role of technology innovation and people's connectivity in testing environmental Kuznets curve and pollution heaven hypotheses across the Belt and Road host countries: New evidence from Method of Moments Quantile Regression. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(5), 5254–5270. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10775-3>
- Anderson, R. G., Canadell, J. G., Randerson, J. T., Jackson, R. B., Hungate, B. A., Baldocchi, D. D., Ban-Weiss, G. A., Bonan, G. B., Caldeira, K., Cao, L., Diffenbaugh, N. S., Gurney, K. R., Kueppers, L. M., Law, B. E., Luysaert, S., & O'Halloran, T. L. (2011). Biophysical considerations in forestry for climate protection. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(3), 174–182. <https://doi.org/10.1890/090179>
- Antweiler, W., Copeland, B. R., & Taylor, M. S. (1998). *Is Free Trade Good for the Environment?* (Working Paper 6707). National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w6707>
- Arrhenius, S. (1896). XXXI. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 41(251), 237–276. <https://doi.org/10.1080/14786449608620846>
- 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. (1995). Economic growth, carrying capacity, and the environment. *Ecological Economics*, 15(2), 91–95. [https://doi.org/10.1016/0921-8009\(95\)00059-3](https://doi.org/10.1016/0921-8009(95)00059-3)
- Baldwin, R. (1995). En *Does sustainability require growth?* Cambridge University Press.
- Balsalobre-Lorente, D., Driha, O. M., Halkos, G., & Mishra, S. (2022). Influence of growth and urbanization on CO2 emissions: The moderating effect of foreign direct investment on energy use in BRICS. *Sustainable Development*, 30(1), 227–240. <https://doi.org/10.1002/sd.2240>

- Balsalobre-Lorente, D., Driha, O. M., Leitão, N. C., & Murshed, M. (2021). The carbon dioxide neutralizing effect of energy innovation on international tourism in EU-5 countries under the prism of the EKC hypothesis. *Journal of Environmental Management*, 298, 113513. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113513>
- Barnet, R. J., & Müller, R. E. (1974). *Global Reach: The Power of the Multinational Corporations*. Simon and Schuster.
- Bashir, M. F. (2022). Discovering the evolution of Pollution Haven Hypothesis: A literature review and future research agenda. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(32), 48210–48232. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20782-1>
- Ben Kheder, S., & Zugravu-Soilita, N. (2008). *The Pollution Haven Hypothesis: A Geographic Economy Model in a Comparative Study* (SSRN Scholarly Paper 1266705). <https://doi.org/10.2139/ssrn.1266705>
- Bhujabal, P., Sethi, N., & Padhan, P. C. (2021). ICT, foreign direct investment and environmental pollution in major Asia Pacific countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(31), 42649–42669. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13619-w>
- Birdsall, N., & Wheeler, D. (1993). Trade Policy and Industrial Pollution in Latin America: Where Are the Pollution Havens? *The Journal of Environment & Development*, 2(1), 137–149. <https://doi.org/10.1177/107049659300200107>
- Blanco, L., Gonzalez, F., & Ruiz, I. (2013). The Impact of FDI on CO2 Emissions in Latin America. *Oxford Development Studies*, 41(1), 104–121. <https://doi.org/10.1080/13600818.2012.732055>
- Blanford, G. J. (2009). R&D investment strategy for climate change. *Energy Economics*, 31, S27–S36. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2008.03.010>

- Bommer, R. (1995). Environmental Policy and Industrial Competitiveness: The Pollution-Haven Hypothesis Reconsidered. *Review of International Economics*, 7(2), 342–355. <https://doi.org/10.1111/1467-9396.00168>
- Bonan, G. B. (2008). Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science*, 320(5882), 1444–1449. <https://doi.org/10.1126/science.1155121>
- Breusch, T. S. (1978). Testing for autocorrelation in dynamic linear models. *Australian economic papers*, 17(31). <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=0004900X&AN=6477185&h=IPMpnBCBeAyBDeZJArGV7hdr%2BxAYOcYaACozYjsey9k0mwUjfx%2BPQcM2%2FwfBkmA4nDzuhl7eYx5hb6j3mePgTw%3D%3D&crl=c>
- Breusch, T. S., & Pagan, A. R. (1979). A Simple Test for Heteroscedasticity and Random Coefficient Variation. *Econometrica*, 47(5), 1287–1294. <https://doi.org/10.2307/1911963>
- Brown, R. L., Durbin, J., & Evans, J. M. (1975). Techniques for Testing the Constancy of Regression Relationships Over Time. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 37(2), 149–163. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1975.tb01532.x>
- Bulus, G. C., & Koc, S. (2021). The effects of FDI and government expenditures on environmental pollution in Korea: The pollution haven hypothesis revisited. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(28), 38238–38253. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13462-z>
- Burakowski, E., Tawfik, A., Ouimette, A., Lepine, L., Novick, K., Ollinger, S., Zarzycki, C., & Bonan, G. (2018). The role of surface roughness, albedo, and Bowen ratio on

- ecosystem energy balance in the Eastern United States. *Agricultural and Forest Meteorology*, 249, 367–376. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.11.030>
- Calderón, C., & Sánchez, I. (2012). Crecimiento económico y política industrial en México. *Problemas del desarrollo*, 43(170), 125–154.
- Cameron, R., & Neal, L. (2005). *Historia económica mundial: Desde el Paleolítico hasta el presente*. Alianza Editorial.
- Cárdenas, M. J. (2010). *Greenpeace: México ante el cambio climático. Evidencias, impactos, vulnerabilidad y adaptación*. Greenpeace. <https://www.greenpeace.org/static/planet4-mexico-stateless/2020/01/173a95d4-vulnerabilidad-mexico-cambio-climatico.pdf>
- Catalán Alonso, H. (2021). Impacto de las energías renovables en las emisiones de gases efecto invernadero en México. *Problemas del desarrollo*, 52(204), 59–83. <https://doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2021.204.69611>
- CEFP. (2002). *Comportamiento de la Inversión Extranjera en México: 2001 – 2002 / II* (CEFP / 026 / 2002). Centro de Estudios de las Finanzas Públicas. <https://www.cefp.gob.mx/intr/edocumentos/pdf/cefp/cefp0262002.pdf>
- 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., Elliott, R. J. R., & Zhang, J. (2011). Growth, Foreign Direct Investment and the Environment: Evidence from Chinese Cities. *Journal of Regional Science*, 51(1), 121–138. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9787.2010.00674.x>
- 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. <https://doi.org/10.1017/S1355770X97000211>



- Colmenares, F. (2008). Petróleo y crecimiento económico en México 1938-2006. *Economía UNAM*, 5(15), 53–65.
- Comín, F. C. (2014). *Historia económica mundial*. Alianza Editorial.
- Conroy, E. D. (1974). Will “Dirty” Industries Seek Pollution Havens Abroad? *SAIS Review (1956-1989)*, 18(3), 48–58.
- Copeland, B. R., & Taylor, M. S. (1994). North-South Trade and the Environment. *The Quarterly Journal of Economics*, 109(3), 755–787. <https://doi.org/10.2307/2118421>
- Copeland, B. R., & Taylor, M. S. (2004). Trade, Growth, and the Environment. *Journal of Economic Literature*, 42(1), 7–71. <https://doi.org/10.1257/002205104773558047>
- Cropper, M., & Griffiths, C. (1994). The Interaction of Population Growth and Environmental Quality. *The American Economic Review*, 84(2), 250–254.
- Cuthbertson, K., Hall, S. G., & Taylor, M. P. (1992). *Applied econometric techniques*. Ann Arbor: University of Michigan Press. [https://www.worldcat.org/title/applied-econometric-techniques/oclc/24106696&referer=brief\\_results](https://www.worldcat.org/title/applied-econometric-techniques/oclc/24106696&referer=brief_results)
- 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>
- Destek, M. A., & Okumus, I. (2019). Does pollution haven hypothesis hold in newly industrialized countries? Evidence from ecological footprint. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(23), 23689–23695. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05614-z>
- Dhrifi, A., Jaziri, R., & Alnahdi, S. (2020). Does foreign direct investment and environmental degradation matter for poverty? Evidence from developing countries. *Structural Change and Economic Dynamics*, 52, 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2019.09.008>

- Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey. *Ecological Economics*, 49(4), 431–455. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.02.011>
- Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlömer, S., Stechow, C. von, & Matschoss, P. (2011). *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Ederington, J., Levinson, A., & Minier, J. (2005). Footloose and Pollution-Free. *The Review of Economics and Statistics*, 87(1), 92–99. <https://doi.org/10.1162/0034653053327658>
- 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>
- El Acuerdo de París | CMNUCC*. (2024). United Nations Climate Change. <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>
- Ellison, D., Morris, C. E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyarso, D., Gutierrez, V., Noordwijk, M. van, Creed, I. F., Pokorny, J., Gaveau, D., Spracklen, D. V., Tobella, A. B., Ilstedt, U., Teuling, A. J., Gebrehiwot, S. G., Sands, D. C., Muys, B., Verbist, B., ... Sullivan, C. A. (2017). Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change*, 43, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002>
- Energy Institute. (2024). *Energy charting tool* [Dataset]. <https://www.energyinst.org/statistical-review/energy-charting-tool/energy-charting-tool>
- Eskeland, G. S., & Harrison, A. E. (2003). Moving to greener pastures? Multinationals and the pollution haven hypothesis. *Journal of Development Economics*, 70(1), 1–23. [https://doi.org/10.1016/S0304-3878\(02\)00084-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3878(02)00084-6)

- Essandoh, O. K., Islam, M., & Kakinaka, M. (2020). Linking international trade and foreign direct investment to CO2 emissions: Any differences between developed and developing countries? *Science of The Total Environment*, 712, 136437. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136437>
- Ethier, W. J. (1982). National and International Returns to Scale in the Modern Theory of International Trade. *The American Economic Review*, 72(3), 389–405.
- Ferguson, W. S. (1973). International Trade Implications of Pollution Control. *Cornell Law Review*, 58, 368–382.
- Foote, E. (1856). ART. XXXI.—Circumstances affecting the heat of the sun's rays. *American Journal of Science and Arts (1820-1879)*, 22(66), 382.
- Freire-Vinueza, C., Meneses, K., & Cuesta, G. (2021). América Latina: ¿Un paraíso de la contaminación ambiental? *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(2), 1–18.
- Ge, M., Friedrich, J., & Vigna, L. (2021). Cuatro gráficos que explican las emisiones de gases de efecto invernadero por país y por sector. *World Resources Institute*. <https://es.wri.org/insights/cuatro-graficos-que-explican-las-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pais-y-por>
- Gill, F. L., Viswanathan, K. K., & Karim, M. Z. A. (2018). The Critical Review of the Pollution Haven Hypothesis (PHH). *International Journal of Energy Economics and Policy*, 8(1), Article 1.
- Gillett, N. P., Malinina, E., Kaufman, D., & Neukom, R. (2023). *Summary for Policymakers of the Working Group I Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report—Data for Figure SPM.1 (v20221116)* (p. 6 Files, 75656 B) [Application/xml]. NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis. <https://doi.org/10.5285/0B2759059AD6474098E40DAD73E0A8EC>
- Girod, B., van Vuuren, D. P., & Hertwich, E. G. (2014). Climate policy through changing consumption choices: Options and obstacles for reducing greenhouse gas

- emissions. *Global Environmental Change*, 25, 5–15.  
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.01.004>
- GOBIERNO DE LA REPÚBLICA. (2013). *REFORMA ENERGÉTICA*.  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/10233/Explicacion\\_ampliada\\_de\\_la\\_Reforma\\_Energetica1.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/10233/Explicacion_ampliada_de_la_Reforma_Energetica1.pdf)
- Godfrey, L. G. (1978a). Testing Against General Autoregressive and Moving Average Error Models when the Regressors Include Lagged Dependent Variables. *Econometrica*, 46(6), 1293–1301. <https://doi.org/10.2307/1913829>
- Godfrey, L. G. (1978b). Testing for multiplicative heteroskedasticity. *Journal of Econometrics*, 8(2), 227–236. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(78\)90031-3](https://doi.org/10.1016/0304-4076(78)90031-3)
- Gómez, M., & Rodríguez, J. C. (2020). The Ecological Footprint and Kuznets Environmental Curve in the USMCA Countries: A Method of Moments Quantile Regression Analysis. *Energies*, 13(24), Article 24. <https://doi.org/10.3390/en13246650>
- Gómez, M., Villicaña Villa, A. D., & Gómez Monge, R. (2024). Impacto de la Inversión Extranjera Directa de Estados Unidos de América en la Degradación Ambiental en México, 1990 – 2019. *Cimexus*, 19(1), 9–27.
- Granger, C. W. J. (1986, agosto 1). *DEVELOPMENTS IN THE STUDY OF COINTEGRATED ECONOMIC VARIABLES*. | *Oxford Bulletin of Economics & Statistics* | EBSCOhost. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0084.1986.mp48003002.x>
- Greene, W. H. (1997). *Análisis econométrico*. Prentice Hall.
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1991). *Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement* (Working Paper 3914). National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w3914>
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1995). Economic Growth and the Environment\*. *The Quarterly Journal of Economics*, 110(2), 353–377. <https://doi.org/10.2307/2118443>

- Gujarati, D. N., & Porter, D. C. (2010). *ECONOMETRIA*. McGraw-Hill Interamericana de España S.L.
- Gütschow, J., Jeffery, M. L., Gieseke, R., Gebel, R., Stevens, D., Krapp, M., & Rocha, M. (2016). The PRIMAP-hist national historical emissions time series. *Earth System Science Data*, 8(2), 571–603. <https://doi.org/10.5194/essd-8-571-2016>
- Gütschow, J., & Pflüger, M. (2023). *The PRIMAP-hist national historical emissions time series (1750-2022) v2.5 (Versión 2.5) [Dataset]*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10006301>
- Halicioglu, F. (2009). An econometric study of CO2 emissions, energy consumption, income and foreign trade in Turkey. *Energy Policy*, 37(3), 1156–1164. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.11.012>
- Hanif, I., Faraz Raza, S. M., Gago-de-Santos, P., & Abbas, Q. (2019). Fossil fuels, foreign direct investment, and economic growth have triggered CO2 emissions in emerging Asian economies: Some empirical evidence. *Energy*, 171, 493–501. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.011>
- He, C., Huang, Z., & Ye, X. (2014). Spatial heterogeneity of economic development and industrial pollution in urban China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 28(4), 767–781. <https://doi.org/10.1007/s00477-013-0736-8>
- He, X., Adebayo, T. S., Kirikkaleli, D., & Umar, M. (2021). Consumption-based carbon emissions in Mexico: An analysis using the dual adjustment approach. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 947–957. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.020>
- Helpman, E. (1984). A Simple Theory of International Trade with Multinational Corporations. *Journal of Political Economy*, 92(3), 451–471. <https://doi.org/10.1086/261236>
- Herzig, C., & Schaltegger, S. (2006). Corporate Sustainability Reporting. An Overview. En S. Schaltegger, M. Bennett, & R. Burritt (Eds.), *Sustainability Accounting and*

*Reporting* (pp. 301–324). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4974-3\\_13](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4974-3_13)

Hollinger, D. Y., Ollinger, S. V., Richardson, A. D., Meyers, T. P., Dail, D. B., Martin, M. E., Scott, N. A., Arkebauer, T. J., Baldocchi, D. D., Clark, K. L., Curtis, P. S., Davis, K. J., Desai, A. R., Dragoni, D., Goulden, M. L., Gu, L., Katul, G. G., Pallardy, S. G., Paw U, K. T., ... Verma, S. B. (2010). Albedo estimates for land surface models and support for a new paradigm based on foliage nitrogen concentration. *Global Change Biology*, 16(2), 696–710. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02028.x>

Holtz-Eakin, D., & Selden, T. M. (1992). *Stoking the Fires? Co2 Emissions and Economic Growth* (Working Paper 4248). National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w4248>

Hossain, Md. E., Islam, Md. S., Bandyopadhyay, A., Awan, A., Hossain, M. R., & Rej, S. (2022). Mexico at the crossroads of natural resource dependence and COP26 pledge: Does technological innovation help? *Resources Policy*, 77, 102710. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102710>

Hsiang, S., & Kopp, R. E. (2018). An Economist's Guide to Climate Change Science. *Journal of Economic Perspectives*, 32(4), 3–32. <https://doi.org/10.1257/jep.32.4.3>

IPCC. (2013, agosto 30). *Ficha informativa del IPCC: ¿Qué es el IPCC?* [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/04/FS\\_what\\_ipcc\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/04/FS_what_ipcc_es.pdf)

IPCC (Ed.). (2018). Annex I: Glossary. En *Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty* (pp. 541–562). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.008>

IPCC (Ed.). (2019). Land–climate interactions. En *Climate Change and Land: IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land*

*Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems*  
(pp. 131–248). Cambridge University Press.  
<https://doi.org/10.1017/9781009157988.004>

Jahanger, A., Yu, Y., Hossain, M. R., Murshed, M., Balsalobre-Lorente, D., & Khan, U. (2022). Going away or going green in NAFTA nations? Linking natural resources, energy utilization, and environmental sustainability through the lens of the EKC hypothesis. *Resources Policy*, 79, 103091.  
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103091>

Jahanger, A., Zubair Chishti, M., Chukwuma Onwe, J., & Awan, A. (2022). How far renewable energy and globalization are useful to mitigate the environment in Mexico? Application of QARDL and spectral causality analysis. *Renewable Energy*, 201, 514–525. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.10.081>

Jarque, C. M., & Bera, A. K. (1980). Efficient tests for normality, homoscedasticity and serial independence of regression residuals. *Economics Letters*, 6(3), 255–259.  
[https://doi.org/10.1016/0165-1765\(80\)90024-5](https://doi.org/10.1016/0165-1765(80)90024-5)

Jia, G., Shevliakova, E., Artaxo, P., De Noblet-Ducoudré, N., Houghton, R., House, J., Kitajima, K., Lennard, C., Popp, A., & Sirin, A. (2019). Land–climate interactions. Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. *Preprint at <https://www.ipcc.ch/srccl/chapter>*.

Johansen, S. & Juselius, K. (1990, mayo 1). *MAXIMUM LIKELIHOOD ESTIMATION AND INFERENCE ON COINTEGRATION--WITH APPLICATIONS TO THE DEMAND FOR MONEY*. | *Oxford Bulletin of Economics & Statistics* | EBSCOhost. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0084.1990.mp52002003.x>

- Kathuria, V. (2018). Does Environmental Governance Matter for Foreign Direct Investment? Testing the Pollution Haven Hypothesis for Indian States. *Asian Development Review*, 35(1), 81–107. [https://doi.org/10.1162/adev\\_a\\_00106](https://doi.org/10.1162/adev_a_00106)
- Kearsley, A., & Riddel, M. (2010). A further inquiry into the Pollution Haven Hypothesis and the Environmental Kuznets Curve. *Ecological Economics*, 69(4), 905–919. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.014>
- Keen, S., Ayres, R. U., & Standish, R. (2019). A Note on the Role of Energy in Production. *Ecological economics*, 157, 40–46.
- Kehoe, T. J., Meza, F., Kehoe, T. J., & Meza, F. (2013). Crecimiento rápido seguido de estancamiento: México (1950-2010). *El trimestre económico*, 80(318), 237–280.
- Kennedy, C., & Lindsey, R. (2018). ¿Cuál es la diferencia entre el calentamiento global y el cambio climático? NOAA Climate.gov. <https://www.climate.gov/news-features/climate-qa/%C2%BFcu%C3%A1-es-la-diferencia-entre-el-calentamiento-global-y-el-cambio-clim%C3%A1tico>
- Khan, M. A., & Ozturk, I. (2020). Examining foreign direct investment and environmental pollution linkage in Asia. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(7), 7244–7255. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07387-x>
- Khan, Z., Ali, S., Umar, M., Kirikkaleli, D., & Jiao, Z. (2020). Consumption-based carbon emissions and International trade in G7 countries: The role of Environmental innovation and Renewable energy. *Science of The Total Environment*, 730, 138945. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138945>
- Khan, Z., Sisi, Z., & Siqun, Y. (2019). Environmental regulations an option: Asymmetry effect of environmental regulations on carbon emissions using non-linear ARDL. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 41(2), 137–155. <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1504145>



- Khattak, S. I., Ahmad, M., Khan, Z. U., & Khan, A. (2020). Exploring the impact of innovation, renewable energy consumption, and income on CO2 emissions: New evidence from the BRICS economies. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(12), 13866–13881. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07876-4>
- Kuznets, S. (1955). Economic Growth and Income Inequality. *The American Economic Review*, VOLUME XLV(NUMBER ONE).
- Laureano, R. C. (2008). El petróleo mexicano y la política exterior de México: Del auge petrolero a la privatización. *Revista de Relaciones Internacionales de la UNAM*. <https://revistas.unam.mx/index.php/rri/article/view/16311>
- Lee, H., Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barret, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S. L., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., ... Park, Y. (2023). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report, Summary for Policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. [Monograph]. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).* <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>
- Lee, H., Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., ... Péan, C. (2023). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. (First). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).* <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>

- Lee, J., & Strazicich, M. C. (2003). Minimum Lagrange Multiplier Unit Root Test with Two Structural Breaks. *The Review of Economics and Statistics*, 85(4), 1082–1089. <https://doi.org/10.1162/003465303772815961>
- Leitão, N. C., Dos Santos Parente, C. C., Balsalobre-Lorente, D., & Cantos Cantos, J. M. (2023). Revisiting the effects of energy, population, foreign direct investment, and economic growth in Visegrad countries under the EKC scheme. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(6), 15102–15114. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23188-1>
- Letchumanan, R., & Kodama, F. (2000). Reconciling the conflict between the 'pollution-haven' hypothesis and an emerging trajectory of international technology transfer. *Research Policy*, 29(1), 59–79. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(99\)00033-5](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(99)00033-5)
- Liddle, B. (2015). What are the carbon emissions elasticities for income and population? Bridging STIRPAT and EKC via robust heterogeneous panel estimates. *Global Environmental Change*, 31, 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.10.016>
- Lindsay, R. (2009, enero 14). *Climate and earth's energy budget*. NASA Earth Observatory. [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Climate%20and%20earths%20energy%20budget&publication\\_year=2009&author=R.%20Lindsey](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Climate%20and%20earths%20energy%20budget&publication_year=2009&author=R.%20Lindsey)
- Liu, Q., Wang, S., Zhang, W., Zhan, D., & Li, J. (2018). Does foreign direct investment affect environmental pollution in China's cities? A spatial econometric perspective. *Science of The Total Environment*, 613–614, 521–529. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.110>
- Mahmood, H. (2023). Trade, FDI, and CO2 emissions nexus in Latin America: The spatial analysis in testing the pollution haven and the EKC hypotheses. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(6), 14439–14454. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23154-x>

- Marín-Leyva, R. A., Zamora-Torres, A. I., & Ortiz-Paniagua, C. F. (2022). Economía, energía y calidad ambiental en APEC, 1990-2018. *Revista Mexicana de Economía y Finanzas Nueva Época REMEF*, 17(4), Article 4. <https://doi.org/10.21919/remef.v17i4.784>
- Markusen, J. R. (1984). Multinationals, multi-plant economies, and the gains from trade. *Journal of International Economics*, 16(3), 205–226. [https://doi.org/10.1016/S0022-1996\(84\)80001-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1996(84)80001-X)
- Martínez Haro, T., & Vargas Hernández, J. G. (2013). Análisis del caso de la cerveza mexicana: La adquisición de grupo modelo por AB-INBEV. *Panorama Económico*, 21(0), 145–157.
- Martín-Martín, A., Orduna-Malea, E., Thelwall, M., & Delgado López-Cózar, E. (2018). Google Scholar, Web of Science, and Scopus: A systematic comparison of citations in 252 subject categories. *Journal of Informetrics*, 12(4), 1160–1177. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2018.09.002>
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Pean, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekci, O., Yu, R., & Zhou, B. (2021). *IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Report]. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Matthews, J. R. (2018). Annex I: Glossary. *Global warming of, 1*, 541–562.
- McNown, R., Sam, C. Y., & Goh, S. K. (2018). Bootstrapping the autoregressive distributed lag test for cointegration. *Applied Economics*, 50(13), 1509–1521. <https://doi.org/10.1080/00036846.2017.1366643>
- Mehraaein, M., Afroz, R., Rahman, M. Z., & Muhibbullah, M. (2021). Dynamic Impact of Macroeconomic Variables on the Ecological Footprint in Malaysia: Testing EKC and

- PHH. *The Journal of Asian Finance, Economics and Business*, 8(5), 583–593.  
<https://doi.org/10.13106/jafeb.2021.vol8.no5.0583>
- Metzler, D. F. (1968). States Co-operate to Fight Air Pollution. *Royal Society of Health Journal*, 88(2), 75–78. <https://doi.org/10.1177/146642406808800209>
- Millimet, D. L., & List, J. A. (2004). The Case of the Missing Pollution Haven Hypothesis. *Journal of Regulatory Economics*, 26(3), 239–262. <https://doi.org/10.1007/s11149-004-7550-7>
- Moomaw, W. R., & Unruh, G. C. (1997). Are environmental Kuznets curves misleading us? The case of CO<sub>2</sub> emissions. *Environment and Development Economics*, 2(4), 451–463. <https://doi.org/10.1017/S1355770X97000247>
- Moore, K. E., Fitzjarrald, D. R., Sakai, R. K., Goulden, M. L., Munger, J. W., & Wofsy, S. C. (1996). Seasonal Variation in Radiative and Turbulent Exchange at a Deciduous Forest in Central Massachusetts. *Journal of Applied Meteorology (1988-2005)*, 35(1), 122–134.
- Muhammad, B., Khan, M. K., Khan, M. I., & Khan, S. (2021). Impact of foreign direct investment, natural resources, renewable energy consumption, and economic growth on environmental degradation: Evidence from BRICS, developing, developed and global countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(17), 21789–21798. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12084-1>
- Mukhtarov, S., Aliyev, F., Aliyev, J., & Ajayi, R. (2023). Renewable Energy Consumption and Carbon Emissions: Evidence from an Oil-Rich Economy. *Sustainability*, 15(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/su15010134>
- Naciones Unidas (ONU). (2015, diciembre 12). *Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC)*. Refworld. <https://www.refworld.org/es/leg/trat/onu/2015/es/134497>

- Narayan, P. K. (2005). The saving and investment nexus for China: Evidence from cointegration tests. *Applied Economics*, 37(17), 1979–1990. <https://doi.org/10.1080/00036840500278103>
- ONU, U. N. (2024). *El Acuerdo de París | Naciones Unidas*. United Nations; United Nations. <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>
- Owusu, E. L., & Odhiambo, N. M. (2014). Financial liberalisation and economic growth in Nigeria: An ARDL-bounds testing approach. *Journal of Economic Policy Reform*, 17(2), 164–177. <https://doi.org/10.1080/17487870.2013.787803>
- Owusu, P. A., & Asumadu-Sarkodie, S. (2016). A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. *Cogent Engineering*, 3(1), 1167990. <https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1167990>
- Özokcu, S., & Özdemir, Ö. (2017). Economic growth, energy, and environmental Kuznets curve. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 639–647. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.059>
- Ozturk, I., & Acaravci, A. (2010). CO2 emissions, energy consumption and economic growth in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 3220–3225. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.005>
- Panayotou, T. (1993). *Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development*. International Labour Office Geneva. <https://ideas.repec.org/p/ilo/ilowps/992927783402676.html>
- Pao, H.-T., & Tsai, C.-M. (2010). CO2 emissions, energy consumption and economic growth in BRIC countries. *Energy Policy*, 38(12), 7850–7860. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.08.045>
- Pesaran, M. H., Shin, Y., & Smith, R. J. (2001). Bounds testing approaches to the analysis of level relationships. *Journal of Applied Econometrics*, 16(3), 289–326. <https://doi.org/10.1002/jae.616>

- Phillips, P. C. B., & Hansen, B. E. (1990). Statistical Inference in Instrumental Variables Regression with I(1) Processes. *The Review of Economic Studies*, 57(1), 99–125. <https://doi.org/10.2307/2297545>
- Porter, M. E., & van der Linde, C. (1995). Toward a New Conception of the Environment-Competitiveness Relationship. *Journal of Economic Perspectives*, 9(4), 97–118. <https://doi.org/10.1257/jep.9.4.97>
- Rafindadi, A. A., Muye, I. M., & Kaita, R. A. (2018). The effects of FDI and energy consumption on environmental pollution in predominantly resource-based economies of the GCC. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 25, 126–137. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.12.008>
- Ramsey, J. B. (1969). Tests for Specification Errors in Classical Linear Least-Squares Regression Analysis. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 31(2), 350–371. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1969.tb00796.x>
- Richardson, A. D., Keenan, T. F., Migliavacca, M., Ryu, Y., Sonnentag, O., & Toomey, M. (2013). Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agricultural and Forest Meteorology*, 169, 156–173. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.012>
- Ritchie, H. (2023). Primary, secondary, final, and useful energy: Why are there different ways of measuring energy? *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/energy-definitions>
- Ritchie, H., Roser, M., & Rosado, P. (2024). Renewable Energy. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/renewable-energy>
- Rodríguez Benavides, D., & López Herrera, F. (2009). Desarrollo financiero y crecimiento económico en México. *Problemas del desarrollo*, 40(159), 39–60.

- Ros, J. (2008). La desaceleración del crecimiento económico en México desde 1982. *El trimestre económico*, 75(299), 537–560.
- Salahuddin, M., Alam, K., Ozturk, I., & Sohag, K. (2018). The effects of electricity consumption, economic growth, financial development and foreign direct investment on CO2 emissions in Kuwait. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2002–2010. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.009>
- Sapkota, P., & Bastola, U. (2017). Foreign direct investment, income, and environmental pollution in developing countries: Panel data analysis of Latin America. *Energy Economics*, 64, 206–212. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2017.04.001>
- Saqib, M., & Benhmad, F. (2021). Updated meta-analysis of environmental Kuznets curve: Where do we stand? *Environmental Impact Assessment Review*, 86, 106503. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106503>
- 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>
- SE, S. de E. (2013, febrero). *Durante 2012, con cifras preliminares, México registró 12,659.4 millones de dólares de Inversión Extranjera Directa*. gob.mx. <http://www.gob.mx/se/prensa/durante-2012-con-cifras-preliminares-mexico-registro-12-659-4-millones-de-dolares-de-inversion-extranjera-directa>
- Selden, T. M., & Song, D. (1994). Environmental Quality and Development: Is There a Kuznets Curve for Air Pollution Emissions? *Journal of Environmental Economics and Management*, 27(2), 147–162. <https://doi.org/10.1006/jeem.1994.1031>
- SEMARNAT, S. de M. A. y R. N., & INECC, I. N. de E. y C. C. (2022). *Contribución Determinada a Nivel Nacional Actualización 2022* (p. 44). UNFCCC.

[https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-11/Mexico\\_NDC\\_UNFCCC\\_update2022\\_FINAL.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-11/Mexico_NDC_UNFCCC_update2022_FINAL.pdf)

- Shahbaz, M., Balsalobre-Lorente, D., & Sinha, A. (2019). Foreign direct Investment–CO<sub>2</sub> emissions nexus in Middle East and North African countries: Importance of biomass energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 217, 603–614. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.282>
- Shahbaz, M., Nasir, M. A., & Roubaud, D. (2018). Environmental degradation in France: The effects of FDI, financial development, and energy innovations. *Energy Economics*, 74, 843–857. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.07.020>
- Solarin, S. A., Al-Mulali, U., Musah, I., & Ozturk, I. (2017). Investigating the pollution haven hypothesis in Ghana: An empirical investigation. *Energy*, 124, 706–719. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.089>
- 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., Common, M. S., & Barbier, E. B. (1996). Economic growth and environmental degradation: The environmental Kuznets curve and sustainable development. *World Development*, 24(7), 1151–1160. [https://doi.org/10.1016/0305-750X\(96\)00032-0](https://doi.org/10.1016/0305-750X(96)00032-0)
- Stern, N. (2008). The Economics of Climate Change. *American Economic Review*, 98(2), 1–37. <https://doi.org/10.1257/aer.98.2.1>
- Stock, J. H., & Watson, M. W. (2012). *Introducción a la econometría*. Pearson.
- Stokey, N. L. (1998). Are There Limits to Growth? *International Economic Review*, 39(1), 1–31. <https://doi.org/10.2307/2527228>
- Sun, C., Zhang, F., & Xu, M. (2017). Investigation of pollution haven hypothesis for China: An ARDL approach with breakpoint unit root tests. *Journal of Cleaner Production*, 161, 153–164. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.119>




- Tamazian, A., Chousa, J. P., & Vadlamannati, K. C. (2009). Does higher economic and financial development lead to environmental degradation: Evidence from BRIC countries. *Energy Policy*, 37(1), 246–253. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.08.025>
- Taylor, M. S. (2005). Unbundling the Pollution Haven Hypothesis. *Advances in Economic Analysis & Policy*, 4(2). <https://doi.org/10.2202/1538-0637.1408>
- Theil, H. (1992). *Henri Theil's Contributions to Economics and Econometrics: Econometric theory and methodology. Vol. I*. Springer Science & Business Media.
- Tinoco-Zermeño, M. A., Torres Preciado, V. H., & Venegas-Martínez, F. (2008). *Deregulation, Financial Development and Economic Growth in Mexico: Long-Term Effects and Causality* (SSRN Scholarly Paper 1010525). <https://doi.org/10.2139/ssrn.1010525>
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., & Kiehl, J. (2009). *Earth's Global Energy Budget*. <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2634.1>
- Tuckett, R. (2019). Greenhouse Gases. En P. Worsfold, C. Poole, A. Townshend, & M. Miró (Eds.), *Encyclopedia of Analytical Science (Third Edition)* (pp. 362–372). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.14031-4>
- Tyndall, J. (1860). VII. Note on the transmission of radiant heat through gaseous bodies. *Proceedings of the Royal Society of London*, 10, 37–39. <https://doi.org/10.1098/rspl.1859.0017>
- US EPA, O. (2016, enero 12). *Understanding Global Warming Potentials* [Overviews and Factsheets]. <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>
- Vidal, G. (2018). Mercados internacionales de capital, inversión extranjera directa y grandes empresas en México. *Ola Financiera*, 11(31), Article 31. <https://doi.org/10.22201/fe.18701442e.2018.31.68113>

- Wagner, U. J., & Timmins, C. D. (2009). Agglomeration Effects in Foreign Direct Investment and the Pollution Haven Hypothesis. *Environmental and Resource Economics*, 43(2), 231–256. <https://doi.org/10.1007/s10640-008-9236-6>
- Waldkirch, A., & Gopinath, M. (2008). Pollution Control and Foreign Direct Investment in Mexico: An Industry-Level Analysis. *Environmental and Resource Economics*, 41(3), 289–313. <https://doi.org/10.1007/s10640-008-9192-1>
- Wang, Q., Zhang, F., & Li, R. (2023). Revisiting the environmental kuznets curve hypothesis in 208 counties: The roles of trade openness, human capital, renewable energy and natural resource rent. *Environmental Research*, 216, 114637. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114637>
- Wang, X., Zhang, T., Nathwani, J., Yang, F., & Shao, Q. (2022). Environmental regulation, technology innovation, and low carbon development: Revisiting the EKC Hypothesis, Porter Hypothesis, and Jevons' Paradox in China's iron & steel industry. *Technological Forecasting and Social Change*, 176, 121471. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121471>
- Watson, R. T., Albritton, D. L., Intergovernmental Panel on Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change, & Intergovernmental Panel on Climate Change (Eds.). (2001). *Climate change 2001: Synthesis report*. Cambridge University Press.
- Weart, S. R. (2008). The Discovery of Global Warming. En *The Discovery of Global Warming* (pp. vii–x). Harvard University Press. <https://doi.org/10.4159/9780674417557-prf>
- Williams, R. H. (1983). Land use planning, pollution control and environmental assessment in the E.C. environment policy. *Planning Outlook*, 26(2), 54–59. <https://doi.org/10.1080/00320718308711699>

- Willis, A. (2003). The Role of the Global Reporting Initiative's Sustainability Reporting Guidelines in the Social Screening of Investments. *Journal of Business Ethics*, 43(3), 233–237. <https://doi.org/10.1023/A:1022958618391>
- Wooldridge, J. M. (2009). *Introduccion a la Econometria*. CENGAGE Learning.
- Zhang, C., & Zhou, X. (2016). Does foreign direct investment lead to lower CO2 emissions? Evidence from a regional analysis in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 943–951. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.226>
- Zhang, X.-P., & Cheng, X.-M. (2009). Energy consumption, carbon emissions, and economic growth in China. *Ecological Economics*, 68(10), 2706–2712. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.05.011>
- Zivot, E., & Andrews, D. W. K. (2002). Further Evidence on the Great Crash, the Oil-Price Shock, and the Unit-Root Hypothesis. *Journal of Business & Economic Statistics*, 20(1), 25–44. <https://doi.org/10.1198/073500102753410372>

## Anexos


### Anexo 1. Reporte de coincidencias de la CGEP con la herramienta "Turnitin iThenticate"

 Página 1 of 301 - Portada Identificador de la entrega tm:oid::3117-411738493

---

**Oscar Nicolas Nicanor**

**EL FENÓMENO DEL CAMBIO CLIMÁTICO UN ESTUDIO DE LAS EMISIONES DE CO2 MEDIANTE LA CURVA AMBIENTAL DE K**

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

---




**Detalles del documento**

Identificador de la entrega tm:oid::3117-411738493	278 Páginas
Fecha de entrega 2 dic 2024, 10:02 a.m. GMT-6	70,990 Palabras
Fecha de descarga 2 dic 2024, 10:05 a.m. GMT-6	407,605 Caracteres
Nombre de archivo EL FENÓMENO DEL CAMBIO CLIMÁTICO UN ESTUDIO DE LAS EMISIONES DE CO2 MEDIANTE LA C...pdf	
Tamaño de archivo 2.3 MB	

## 29% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

### Fuentes principales

- 25%  Fuentes de Internet
- 18%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

---

### Marcas de integridad

#### N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitan distinguir de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Anexo 2. Reporte de coincidencias interno con la herramienta "plagium"



Oscar Nicolás (29.11.24).docx

29/11/2024


# 15c5bc30-aea2-11ef-88bd-b38a23aec251

Semejanza: 15.1% Riesgo: probable

### Anexo 3. Formato de declaración de originalidad y uso de inteligencia artificial

## Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado  
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
<b>Programa educativo</b>	Doctorado en Ciencias en Negocios Internacionales	
<b>Título del trabajo</b>	"EL FENÓMENO DEL CAMBIO CLIMÁTICO: UN ESTUDIO DE LAS EMISIONES DE CO2 MEDIANTE LA CURVA AMBIENTAL DE KUZNETS Y LA HIPÓTESIS DEL PARAÍSO DE CONTAMINACIÓN EN MÉXICO"	
	<b>Nombre</b>	<b>Correo electrónico</b>
<b>Autor/es</b>	Oscar Nicolás Nicanor	<a href="mailto:0850339h@umich.mx">0850339h@umich.mx</a>
<b>Director</b>	José Carlos Alejandro Rodríguez Chávez	<a href="mailto:jcrodriguez@umich.mx">jcrodriguez@umich.mx</a>
<b>Codirector</b>		
<b>Coordinador del programa</b>	Mario Gómez Aguirre	<a href="mailto:doc_cs_negocios.internacionales@umich.mx">doc_cs_negocios.internacionales@umich.mx</a>


Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	Sí	Se utilizó inteligencia artificial para buscar algunas descripciones de fórmulas y sus nomenclaturas matemáticas generales.

# Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado  
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	Sí	Se utilizó herramienta de traducción al idioma español
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Oscar Nicolás Nicanor 
Lugar y fecha	Morelia Michoacán, a 02 de diciembre de 2024.