



**“EL EFECTO DE LARGO PLAZO DEL CRECIMIENTO ECONÓMICO
EN LA CONTAMINACIÓN: EVIDENCIA DE LA CURVA
MEDIOAMBIENTAL DE KUZNETS EN CHILE”**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN ANÁLISIS ECONÓMICO**

**Alumno: Nelson Felipe Castillo Acevedo
Profesor Guía: Andrés Gómez-Lobo**

Santiago, Agosto 2024

EL EFECTO DE LARGO PLAZO DEL CRECIMIENTO ECONÓMICO EN LA CONTAMINACIÓN : EVIDENCIA DE LA CURVA MEDIOAMBIENTAL DE KUZNETS EN CHILE

Nelson Castillo*

August 29, 2024

Facultad de Economía y Negocios, Universidad de Chile

Abstract

Esta investigación analiza el efecto del crecimiento económico en la contaminación en Chile, en un horizonte de largo plazo. La relevancia económica de esta temática proviene del hecho de que: (1) en el corto plazo los procesos productivos traen consigo uso de energías y generación de residuos que pueden causar daños en la salud, (2) pero el incremento de ingresos puede generar cambios estructurales, tecnológicos y en las preferencias de los consumidores que podrían disminuir el impacto negativo al medio ambiente. En este contexto, el presente trabajo analiza la hipótesis de la curva medioambiental de Kuznets para el caso de Chile. La metodología que se emplea son modelos Autorregresivos de Rezagos Distribuidos (ARDL) con análisis de cointegración, para poder obtener estimaciones de la elasticidad crecimiento económico-contaminación de largo plazo. La evidencia sugiere que en general hay una relación de largo plazo entre el crecimiento económico y diversos contaminantes atmosféricos, con forma de U-invertida solo para contaminantes locales como SO_2 y los materiales particulados finos. Se mencionan las principales limitantes sobre la estimación de la Curva Medioambiental de Kuznets para el caso de Chile.

Keywords: Curva medioambiental de Kuznets (EKC), Contaminación, Crecimiento Económico, Modelo ARDL, Largo Plazo, Producción, Emisiones, Chile.

JEL: Q5

*Universidad de Chile, Department of Economics. Email: ncastilloa@fen.uchile.cl

Abstract

This paper examines the long-term effects of economic growth on pollution in Chile. The economic relevance of this topic comes from the fact that: (1) production processes involve energy use and waste generation that can cause health damage, (2) but increased income can lead to structural, technological, and consumer preference changes that could reduce the negative impact on the environment. In this context, the present paper analyzes the environmental Kuznets curve hypothesis for the case of Chile. The methodology used is Autoregressive Models of Distributed Lags (ARDL) with cointegration analysis, to obtain estimates of the long-run economic growth-pollution elasticity. The evidence suggests that in general there is a long-term relationship between economic growth and various atmospheric pollutants, with an inverted U-shaped curve only for local pollutants such as SO_2 and fine particulate matter. Limitations of the estimation of the Environmental Kuznets Curve in the case of Chile are mentioned.

Highlights

- Existe una relación de largo plazo estadísticamente significativa entre el crecimiento económico y algunos contaminantes como el CO_2 , SO_2 , NO_x , material particulado fino de 2.5 (PM2.5) y 10 (PM10) micro gramos.
- La hipótesis de la Curva Medioambiental de Kuznets (EKC) se cumple para los contaminantes locales como el SO_2 y ambos materiales particulados finos.
- Para aquellos contaminantes que cumplen la EKC, el nivel de ingresos requerido para comenzar a disminuir la contaminación se alcanzó durante los años 90's.

1 Introducción

Un debate permanente en la literatura económica y las políticas públicas es cómo lograr el desarrollo económico de forma eficiente y sostenible. De esta forma, los diversos procesos productivos y actividades que se desarrollan diariamente son pilares fundamentales en el crecimiento económico. No obstante, estos procesos y actividades pueden provocar ciertas externalidades negativas que resultan en costos sociales. Una de estas externalidades es la contaminación, el tema principal que aborda la presente investigación.

Desde la teoría económica, Andreoni y Levinson (2001) destacan que la contaminación de un país depende de su nivel de ingresos y del tipo de tecnología empleada para combatir la polución. No obstante, la evidencia empírica sobre la relación de largo plazo entre la contaminación y el crecimiento económico es mixta, ya que se puede encontrar una relación positiva, negativa e incluso inexistente; la cual depende del nivel de ingresos del país y su categoría de desarrollo económico¹. Por ejemplo, Narayan y Narayan (2010), encontraron una relación negativa en el largo plazo entre la contaminación y el crecimiento económico en los países desarrollados y de ingreso alto.

El presente trabajo tiene por objetivo analizar la existencia de una relación entre el crecimiento económico y la contaminación en el largo plazo. En particular, comprobar la existencia de la elasticidad ingreso-contaminación y si la relación de largo plazo entre estas variables es cuadrática y cóncava para el caso de Chile. Esto lleva a introducir el concepto de la Curva Medioambiental de Kuznets (EKC, por sus siglas en inglés) que, similar a la ideada por Simon Kuznets, sostiene que la relación entre el ingreso y la contaminación tiene forma de U invertida, es decir, una relación cuadrática y cóncava. Esta forma indica que a medida que crece la economía aumenta la contaminación hasta un punto máximo, donde desde un nivel de ingresos denominado “punto de inflexión” comienzan a reducirse los niveles de contaminación (Dinda, 2004).

La contaminación como tal es un problema a nivel global que afecta al desarrollo humano, UN Environment (2019) afirma que la contaminación afecta la salud, especialmente entre los infantes y niños, generando riesgos en su desarrollo. Del mismo modo, asegura que en un futuro se elevará el número de muertes producto de la contaminación, destacando como causas las enfermedades respiratorias, agua contaminada con desechos y la resistencia desarrollada por bacterias a diversos antibióticos.

La Organización Mundial de la Salud (OMS), por su parte, ilustra el complejo escenario que se suscita en las últimas décadas, donde la misma institución menciona que “Todos los días,

¹Según el Banco Mundial, un país desarrollado siempre poseerá un nivel alto de ingresos. Sin embargo, un país de altos ingresos no necesariamente será desarrollado; puesto que requiere de cumplir otros requisitos asociados a la calidad de vida y desarrollo humano.

cerca del 93% de los niños del mundo menores de 15 años (es decir, 1.800 millones de niños) respiran aire tan contaminado que pone en grave peligro su salud y su crecimiento”. A estos datos se suman estimaciones de la OMS, que indican que aproximadamente 600.000 niños fallecieron en 2016 producto de infecciones respiratorias agudas causadas por aire contaminado (Organización Mundial de la Salud, 2018).

La contaminación como tal puede ser de distintos tipos, pero para efectos de este artículo se centrará en los contaminantes atmosféricos, es decir, aquellos gaseosos presentes en el aire como lo son el Dióxido de Carbono (CO_2), Dióxido de Azufre (SO_2), Hidrocarburos, Material Particulado, etc. Dado que esta investigación se centra en Chile, se hace la distinción entre contaminantes globales y locales para tener en cuenta cuáles son más preponderantes en el país.

A nivel global el CO_2 , SO_2 , Óxido Nitroso (N_2O) e hidrocarburos son los más relevantes porque forman parte de los Gases de Efecto Invernadero. Al aumentar los niveles de concentración de estos gases, se eleva la cantidad de energía solar en la atmósfera lo que provoca un incremento de la temperatura del planeta.

El CO_2 es el gas que ocupa más volumen en la atmósfera debido al uso de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica, transporte y procesos industriales (Dilmore y Zhang, 2018). Asimismo, el Ministerio del Medio Ambiente (2021) revela que las mayores fuentes de contaminación del aire provienen de los medios de transporte, actividades industriales y la combustión a través del uso de leña; siendo dichos contaminantes el material particulado de 2.5 y 10 micrómetros, Dióxido de Azufre y Óxidos de Nitrógeno.

Dado lo anterior, la presente investigación busca responder las siguientes preguntas: (i) ¿Existe en el largo plazo una relación entre la contaminación atmosférica y el crecimiento económico para el caso de Chile?, (ii) De existir dicho efecto, ¿hay evidencia favorable para la hipótesis de la curva medioambiental de Kuznets? y (iii) De comprobarse la EKC, ¿cuál sería el “punto de inflexión” para Chile?

La primera hipótesis que se plantea es que efectivamente existe una relación de largo plazo entre el crecimiento económico y la contaminación atmosférica. Esto puede cumplirse teniendo en cuenta los efectos de escala, tecnológicos y de composición (Dinda, 2004), los cuales están estrechamente relacionados con los procesos productivos.

La segunda hipótesis, corresponde a la existencia de la EKC en Chile. Esta hipótesis está motivada en que, a medida que aumenta el nivel de ingresos de un país, mayor es la demanda por más calidad ambiental y esfuerzos por reducir la contaminación, ya que la calidad ambiental es un bien de “lujo”, cuya elasticidad ingreso es mayor a 1 (Dinda,

2004). En consecuencia, Chile al ser clasificado como un país de ingresos altos², llevaría a pensar que la EKC se cumple, sobre todo en contaminantes locales.

La tercera hipótesis es que al menos para los contaminantes locales, el “punto de inflexión” ya debiese haber sido alcanzado, tomando en cuenta que Chile es un país de ingresos altos donde se debiera manifestar una mayor preocupación por el medio ambiente y presentar tecnologías para combatir la contaminación local con retornos a escala crecientes.

Los estudios que buscan comprobar la existencia de la EKC están principalmente asociados a la metodología con datos de panel empleando un conjunto de países (Dasgupta et al., 2002). No obstante, otros autores han innovado con metodologías en series de tiempo, para hacer el análisis a nivel nacional. De esta manera, para contestar las preguntas de investigación, se utiliza un modelo autorregresivo de rezagos distribuidos (ARDL, por sus siglas en inglés) en conjunto con un análisis de cointegración.

Esta investigación tiene por objetivo ser un aporte a la literatura sobre la EKC en países latinoamericanos. Pues, si bien hay extensa literatura sobre la relación de largo plazo entre contaminación y crecimiento económico, y la hipótesis de la EKC, los estudios para el caso de Chile son escasos, particularmente usando metodologías de series de tiempo. En consecuencia, esta investigación sirve como base para motivar futuros estudios en el tópico para Chile. Del mismo modo, se espera documentar el estado de Chile frente a los diversos contaminantes atmosféricos.

La relevancia de estudiar la relación entre crecimiento económico y la contaminación radica en dos puntos relevantes. El primero se refiere al debate sobre el crecimiento económico y su impacto en el medio ambiente. En concreto, algunos economistas suponen que a mayor ingreso se incrementa la contaminación dada la mayor producción; mientras que otros establecen que el aumento del nivel de ingresos derivado del crecimiento económico reduce los niveles de daño ambiental (Beckerman, 1992). A su vez, esto último sería una precondition para encaminarse al desarrollo sustentable (Bhagawati, 1993). El segundo punto es que los procesos de producción vienen acompañados de residuos negativos, correspondientes a contaminantes atmosféricos; los cuales tienen un impacto negativo en la salud. La Universidad de Chile (2021) alerta que aproximadamente el 60% de la población chilena se encuentra expuesta a altos niveles de material particulado, lo que se ha traducido en un número que supera las 3.000 hospitalizaciones por tal causa.

Es importante señalar que los efectos de la contaminación no solo se limitan a la salud, puesto que Graff Zivin y Neidell (2013) demuestran que la contaminación también impacta el desarrollo del capital humano. Estos autores concluyen que la regulación ambiental se

²Ver <https://datos.bancomundial.org/pais/chile>.

puede considerar como una inversión para fomentar el crecimiento económico en el largo plazo. La evidencia en el caso de Chile, mostrada por Bharadwaj et al. (2017), apunta al mismo resultado, donde la contaminación es un factor negativo para el desarrollo del capital humano.

Los resultados del presente estudio indican que se cumple la hipótesis de la EKC para contaminantes locales como el SO_2 y materiales particulados finos, donde ya se sobrepasó el “punto de inflexión”. Por otro lado, para contaminantes como el CO_2 y gases de la familia del Óxido de Nitrógeno (NO_x) la evidencia también sugiere la existencia de una curva en forma de U, donde ya se habría pasado el “punto de inflexión”, pero en estos casos los resultados son menos robustos que los anteriores. Para el resto de contaminantes la evidencia es nula o casi nada robusta sobre una posible relación en el largo plazo.

El documento está organizado de la siguiente forma: La sección 2 presenta la revisión de literatura asociada al tópico de la relación de largo plazo entre crecimiento económico y contaminación. La sección 3 corresponde a los datos y estadística descriptiva, buscando explicar los datos usados y motivar más el por qué del estudio. La sección 4 presenta el modelo teórico base junto a la estrategia empírica. La sección 5 corresponde a los resultados. La sección 6 a las limitaciones y futuros desafíos. Por último, la sección 7 resume las conclusiones.

2 Revisión de Literatura

Grossman y Krueger (1991) fueron los primeros en introducir el concepto de Curva Medioambiental de Kuznets al estudiar la relación entre el ingreso per cápita y la contaminación. Usando una metodología de datos de panel, estos autores encuentran que para países desarrollados y en vías de desarrollo el comportamiento entre ingreso per cápita y la contaminación es una U invertida. Esto significa que a medida que aumentan los ingresos aumenta la contaminación hasta un punto de inflexión, donde los niveles de contaminación comienzan a decrecer a medida que los ingresos siguen aumentando. Su contribución principal es la formulación de la hipótesis de la EKC, que ha desembocado en varios estudios relacionados al concepto.

La evidencia empírica es bastante mixta en cuanto a resultados sobre el comportamiento de la relación de largo plazo entre el crecimiento económico y la contaminación, es decir, la Curva Medioambiental de Kuznets, no llegándose a un consenso ni siquiera con los contaminantes más convencionales (Dasgupta et al., 2002). De esta manera, la literatura se puede agrupar según la metodología empleada dado el tipo de datos con los que trabajan los autores, donde algunos emplean datos de panel y otros series de tiempo (Stern, 2017).

Un ejemplo de la metodología de datos de panel es Figueroa y Pasten (2009), quienes emplean un modelo de coeficientes aleatorios para analizar la relación entre el ingreso per cápita y las emisiones de SO_2 . Estos autores encuentran evidencia favorable y robusta de la EKC en países desarrollados, y en 17 de 28 países de ingreso alto³, concluyendo que solo en algunos países, la EKC se sostiene, mientras en otros no puede inferirse mucho producto de la falta de robustez de los resultados.

Continuando la misma línea metodológica, a nivel de Latinoamérica Romero y De Jesús (2016) a través de datos de la CEPAL y un modelo de efectos fijos usando como variable proxy de contaminación el consumo de energía, no encuentran evidencia favorable para la EKC. Más aún, mencionan a Chile entre los países que poseen una de las mayores elasticidades ingreso-consumo de energía. Empleando una regresión cuantílica con datos de panel Albulescu et al. (2019) presentan resultados mixtos respecto a la EKC en América Latina, donde la evidencia se presenta en los cuantiles bajos y altos de contaminación por CO_2 , tanto para países de bajos como de altos ingresos.

Innovando con datos de panel Stern y Dijk (2017) emplean un modelo que unifica la EKC y la clásica estimación de modelos de crecimiento con beta convergencia usando un contaminante local, el material particulado fino de 2.5 micrómetros, donde sus conclusiones son poco alentadoras y dejan más interrogantes que respuestas al encontrar una correlación positiva entre contaminación y el ingreso. Además, encuentran “puntos de inflexión” mucho más altos sugiriendo que los resultados de la literatura previa están sesgados.

Stern (2017) incrementa la controversia respecto a los modelos de datos de panel en este tópico al criticar que parte la literatura omite la posibilidad cointegración entre la contaminación y el ingreso, y que quienes tratan este problema lo hacen de forma incorrecta al asumir que todos los países de la data tienen el mismo vector de cointegración.

En el análisis de series de tiempo, la literatura suele emplear modelos autorregresivos de rezagos distribuidos (ARDL) ajustando por la corrección de errores mediante el modelo de corrección de errores (VECM).

Se puede mencionar a Tiwari et al. (2013), donde utilizando un modelo ARDL y VECM, analizando la relación entre la curva EKC y el consumo de carbón, tanto en el corto como el largo plazo. Estos autores encuentran evidencia a favor de la curva EKC tanto en el corto como largo plazo en la India, con causalidad bidireccional.

Por otro lado, Frodyma et al. (2021) estiman la EKC incorporando la forma cuadrática del

³Como se señaló en el pie de página 1, un país de altos ingresos no es necesariamente desarrollado.

ingreso per cápita, para distintos países europeos usando un modelo ARDL. Los resultados muestran que, para la mayoría de países europeos, la hipótesis de la EKC no se sostiene.

En Brasil, Udemba y Tosun (2022), empleando un modelo ARDL junto a la aplicación del “ARDL Bounds test”⁴, encuentran evidencia desfavorable de la EKC, donde las variables del modelo cointegran, pero se observa una curva en forma de U.

Existe más literatura que emplea series de tiempo y datos de panel, donde en general los resultados varían dependiendo de la especificación y variables de control usadas, lo que se traduce en conclusiones poco robustas, tal como lo afirma Stern (2004), quien argumenta que la especificación econométrica es relevante y determinante en los resultados obtenidos.

Hasta el momento, la literatura sobre la relación a largo plazo entre crecimiento económico y contaminación en Chile es escasa. Destaca Kirikkaleli et al. (2022), quienes, empleando datos del Banco Mundial (WDI⁵), el Fondo Monetario Internacional y British Petroleum, con series desde 1990 al 2017, encuentran una relación de largo plazo entre el crecimiento económico, las emisiones de CO_2 del consumo de carbón y otras variables macroeconómicas, como la inversión extranjera.

A pesar de la evidencia mixta que presenta la literatura y las críticas que surgen con el tiempo respecto a las metodologías y las falencias de los modelos, el estudio sigue siendo interesante porque permitirá al menos dar un indicio sobre la relación entre el ingreso y la contaminación. Además, al extender el análisis a otros contaminantes atmosféricos locales, puede servir como guía para futuras políticas relacionadas con aquellos contaminantes que tienen mayor probabilidad de causar daños a la salud, especialmente a corto plazo⁶.

⁴Más adelante en la estrategia empírica se explica en qué consiste el test.

⁵World Development Indicators.

⁶Si bien el CO_2 es el más conocido por su efecto invernadero, otros gases, como los contaminantes climáticos de vida corta, tienen un impacto aún más negativo en el medio ambiente y la salud cuando la exposición es prolongada, incluso en el corto plazo. Ver <https://www.unep.org/news-and-stories/story/5-dangerous-pollutants-youre-breathing-every-day>

3 Datos y Estadística Descriptiva

Los datos del presente estudio corresponden a series temporales entre 1970 y 2018. Se utilizó información proveniente del Banco Mundial para las variables económicas y datos de la Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR)⁷ para las emisiones de gases contaminantes. En las siguientes secciones se describirán las variables relevantes y la estadística descriptiva.

3.1 Descripción de Variables

- **Contaminación per cápita:** Emisiones de contaminantes por persona en toneladas métricas. Estas son nuestras variables de interés (dependientes) y son las que se usan en la literatura. En el presente estudio, se hace uso de las emisiones de contaminantes globales de CO_2 , Metano (CH_4), N_2O y el total gases de efecto invernadero⁸ (GEI), y contaminantes locales como el SO_2 , Material Particulado Fino ($MP_{2.5}$ y MP_{10}) y NO_x .
- **PIB Real per cápita:** Producto Interno Bruto por persona usando el nivel de precios base el año 2010, medido en US\$.
- **Variables de consumo energético per cápita:** Variables como el consumo de electricidad en kilovatios-hora (kWh), el consumo de energías renovables medido en kWh, y el consumo de carbón y gas, medidos en toneladas métricas (TM). Estas variables inciden en las emisiones de contaminantes específicos; por ejemplo, el consumo de gas puede asociarse a la emisión de CH_4 . Se emplearán como variables de control principalmente para evaluar la robustez de los resultados.
- **Variables económicas:** Entrada de inversión extranjera directa (FDI), formación bruta de capital, nivel de industrialización y exportaciones de minerales. Estas variables económicas son relevantes según la evidencia de Akan et al. (2022), quienes muestran que los países con mejores resultados ambientales tienden a tener estas variables como estadísticamente significativas.

3.2 Estadísticas Descriptivas

Como se aprecia en la Tabla 1, la contaminación, medida en CO_2 per cápita, ha aumentado en promedio a lo largo del tiempo. Inicialmente, desde la década de los 70 hasta los 80, los niveles de emisión disminuyeron. No obstante, desde los 80 hasta la actualidad, los niveles de emisión han presentado una tendencia al alza que ilustra cómo la contaminación por

⁷Ver EDGAR (European Commission, Joint Research Centre (JRC), International Energy Agency (IEA), 2022).

⁸Como Proxy del total de gases efecto invernadero, se emplea la suma de aquellos gases que entran en la categoría de gases de efecto invernadero. Se mide en toneladas métricas de CO_2 equivalente.

CO_2 se ha transformado en un problema latente.

En el caso del resto de los gases de efecto invernadero, estos tienen menores niveles de emisión con respecto al CO_2 , destacando principalmente el CH_4 , cuyas emisiones han caído fuertemente en las últimas décadas. Respecto al N_2O , los niveles promedio durante las décadas han sido bastante volátiles, con una ligera tendencia negativa en la última década. Los GEI totales, por su parte, siguen la misma tendencia del CO_2 por razones evidentes.

Los contaminantes locales, como el material particulado y el NO_x , también presentan una tendencia al alza, pero los valores promedio son mucho más bajos en comparación con las emisiones de CO_2 , y aunque la tendencia es al alza, es mucho más débil. Por otro lado, el SO_2 muestra una tendencia plana a lo largo del tiempo. Aunque las emisiones físicas de estos contaminantes son menores que las de los gases de efecto invernadero, tienden a ser más dañinas para la salud.

Las variaciones en los niveles promedio de las variables a través de las décadas, sumadas a los cambios en tendencia⁹, sugieren que las variables se comportan de forma no estacionaria¹⁰.

⁹Para una ilustración más gráfica, ver Anexos 1, 2 y 3.

¹⁰Para esto, se llevan a cabo las pruebas de hipótesis correspondientes, las cuales se ilustran más adelante.

Tabla 1: Media de las variables relevantes a lo largo de las décadas.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	Total	1970-1979	1980-1989	1990-1999	2000-2009	2010-2018
	Media	Media	Media	Media	Media	Media
Emissiones de CO_2 per cápita en TM	4.33	3.40	2.87	4.04	4.92	6.65
Emissiones de SO_2 per cápita en TM	.0311	.0301	.0307	.0334	.0248	.0372
Emissiones de CH_4 per cápita en TM	.0615	.0664	.0676	.0608	.0601	.0516
Emissiones de N_2O per cápita en TM	.0014	.0013	.0013	.0015	.0017	.0015
Emissiones de GEI per cápita en TM eq. CO_2	5.21	4.77	4.11	4.92	5.75	6.64
Emissiones de NO_x per cápita en TM	.0166	.0123	.0118	.0175	.0191	.0229
Emissiones de PM2.5 per cápita en TM	.0058	.0036	.0041	.0062	.0066	.0086
Emissiones de PM10 per cápita en TM	.0104	.0062	.0068	.0114	.0125	.0155
PIB Real per cápita	7655	4055	4564	7033	9996	13181
Consumo de energías renovables per cápita en Kwh	391	17.64	48.43	296.8	358	1287
Consumo de eléctrico per cápita en Kwh	1888	790.2	998.4	1742	3011	3692
Consumo de Petroleo per cápita en TM	6.95	4.90	4.37	6.99	8.897	9.87
Consumo de Gas per cápita en TM	1.78	.48	.59	1.59	3.72	2.60
Consumo de Carbón per cápita en TM	1.92	.97	.98	2.00	1.99	3.85
Industrializacion (% del Pib)	35.88	39.5	37.82	35.1	35.12	31.41
Exportaciones de Minerales y Metales (% exp. mercaderías)	57.88	76.86	59.47	45.34	51.73	56.17
<i>Observaciones</i>	49	10	10	10	10	9

Fuente: Elaboración propia en base a datos de la EDGAR (European Commission, Joint Research Centre (JRC), International Energy Agency (IEA), 2022).

Adicionalmente, resulta conveniente hacer el análisis de un índice denominado “*Decoupling Index*”. Esta variable desarrollada por la OCDE¹¹, es utilizada por Marques et al. (2018) y permite ilustrar de forma descriptiva y cuantitativa, cómo se va comportando la contaminación y el crecimiento económico a lo largo del tiempo.

El índice se define de la siguiente forma:

$$DI_t = 1 - \frac{\frac{POL_t}{PIB_t}}{\frac{POL_0}{PIB_0}} \quad (1)$$

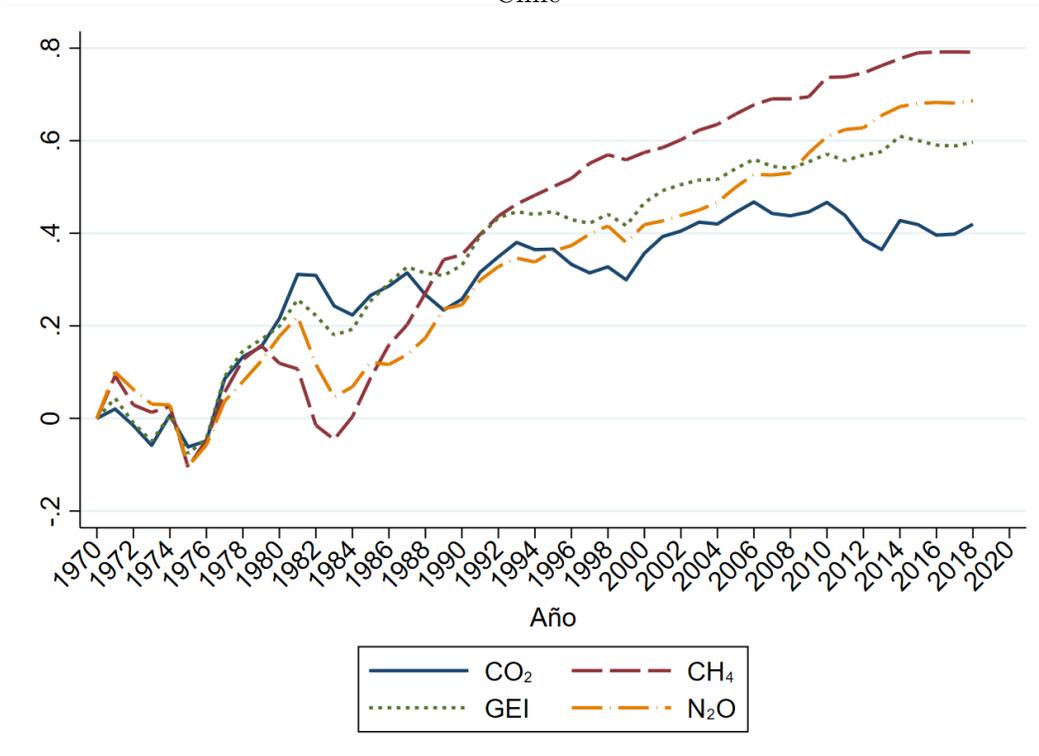
Donde POL_t corresponde al nivel de contaminación per cápita en t y PIB_t al PIB per cápita en el periodo t . A medida que el índice converge al valor de 1, se presentaría un crecimiento económico acompañado de un crecimiento de la contaminación casi nulo (en términos relativos), es decir, la contaminación se desacoplaría del crecimiento económico. En caso de tomar un valor cualquiera entre 0 y 1, se observa que el crecimiento económico va acompañado de un crecimiento positivo de la contaminación, pero la contaminación crece por debajo del crecimiento económico. Por último, valores bajo 0, indicarían que los niveles de contaminación están creciendo más que los ingresos.

En la Figura 1 se aprecia el comportamiento del índice, calculado para gases de efecto invernadero. En un comienzo se ven valores negativos, pero a finales de 1970, se aprecia una tendencia al alza del índice, indicando que en Chile a medida que transcurre el tiempo, el crecimiento económico sobrepasa al crecimiento de la contaminación.

De lo más destacable es el metano junto al óxido nitroso, que toman valores sobre 0.6 en las últimas décadas, sobre todo el metano, que presenta una tendencia que lo acercará a un valor de 1 en el futuro. Así, el CH_4 junto al N_2O son los contaminantes más controlados dentro de las emisiones de gases con efecto invernadero, señalando que a medida que transcurre el tiempo las emisiones se han ido desacoplando del crecimiento económico. Por otro lado, el dióxido de carbono si bien ha ido mejorando en lo que respecta al índice, se ha ido estancando en las últimas dos décadas. Aún así, se destaca que la contaminación en CO_2 por unidad de producto per cápita ha ido disminuyendo.

¹¹Ver OCDE (2002).

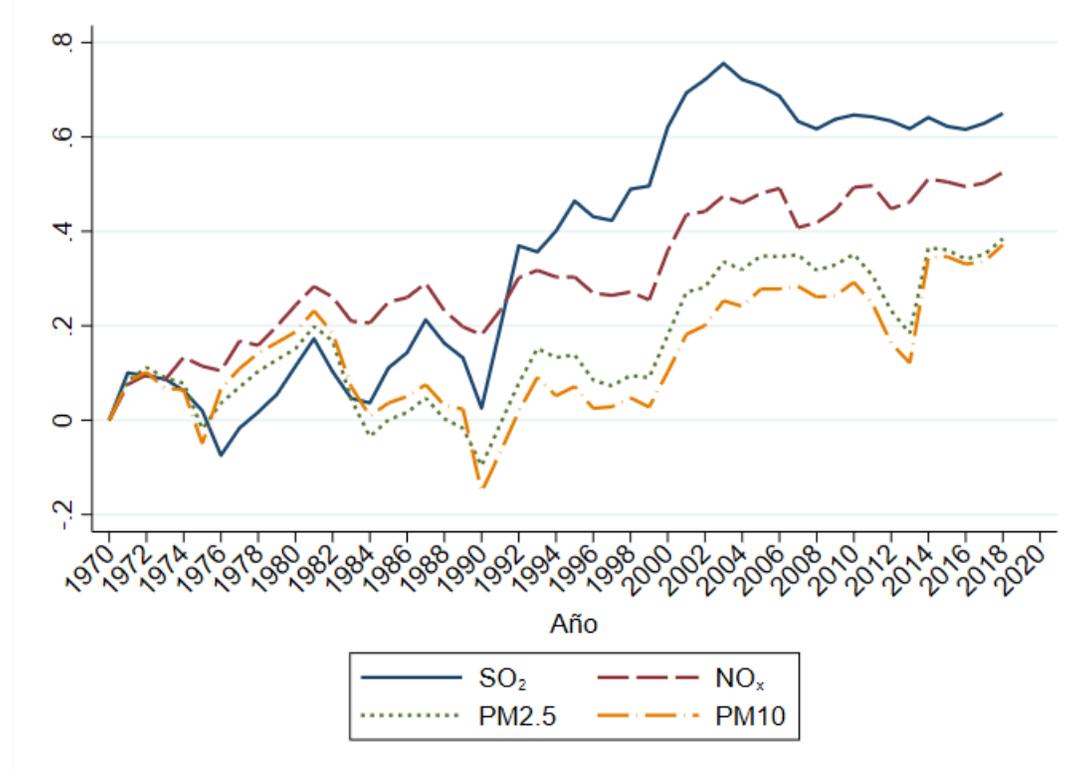
Figura 1: Decoupling Index a lo largo del tiempo para gases de efecto invernadero en Chile



Fuente: Elaboración propia en base a datos de la EDGAR (European Commission, Joint Research Centre (JRC), International Energy Agency (IEA), 2022).

Respecto de la Figura 2, se aprecia el mismo índice, pero para contaminantes locales. En este caso, el más destacable es el SO_2 al tomar valores sobre 0.6 en las últimas dos décadas. No obstante, se presenta un estancamiento en los valores de los índices. En el caso del NO_x el índice va en alza, pero con cierto estancamiento alrededor del 0.5 en los últimos años. Por último, los materiales particulados previo a la década del 2000 han sido bajos y cercanos a cero, pero con cierta mejora en las últimas dos décadas, lo que en general indica parte de la efectividad de las políticas ambientales en Chile.

Figura 2: Decoupling Index a lo largo del tiempo para otros contaminantes en Chile



Fuente: Elaboración propia en base a datos de la EDGAR (European Commission, Joint Research Centre (JRC), International Energy Agency (IEA), 2022).

Por su parte, la Tabla 2 muestra los valores promedios del índice a través de las décadas, donde se evidencia la tendencia al alza. Examinar estos datos a través del tiempo permite tener una visión más general del comportamiento de los índices, que en este caso, ilustran una mejoría a lo largo del tiempo al desacoplarse la contaminación del crecimiento económico.

Tabla 2: Media del Índice de Desacoplamiento por década

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	1970-1979	1980-1989	1990-1999	2000-2009	2010-2018
	Media	Media	Media	Media	Media
CO_2	0.022	0.267	0.331	0.424	0.413
SO_2	0.034	0.123	0.365	0.680	0.633
CH_4	0.035	0.123	0.483	0.643	0.769
NO_x	0.113	0.243	0.270	0.441	0.493
PM2.5	0.068	0.058	0.074	0.308	0.320
PM10	0.075	0.090	0.014	0.234	0.284
GEI	0.028	0.255	0.420	0.523	0.584
N_2O	0.030	0.141	0.349	0.486	0.658
<i>Observaciones</i>	10	10	10	10	9

Fuente: Elaboración propia en base a datos de la EDGAR (European Commission, Joint Research Centre (JRC), International Energy Agency (IEA), 2022).

Tabla 3: Correlación entre el logaritmo natural del PIB per cápita y contaminante per cápita

	$Ln(PIB)$
$Ln(CO_2)$	0.94*
$Ln(SO_2)$	0.15
$Ln(CH_4)$	-0.81*
$Ln(NO_x)$	0.96*
$Ln(PM2.5)$	0.96*
$Ln(PM10)$	0.96*
$Ln(N_2O)$	0.78*
$Ln(GEI)$	0.88*

Fuente: Elaboración propia en base a datos de la EDGAR (European Commission, Joint Research Centre (JRC), International Energy Agency (IEA), 2022).

* $p < 0.05$

La Tabla 3 muestra las correlaciones entre el PIB per cápita y las emisiones de contaminantes per cápita, donde se aprecian correlaciones positivas y estadísticamente significativas en la mayoría de los casos, salvo en el caso del SO_2 y el CH_4 . Para el SO_2 , la correlación es cercana a cero y estadísticamente no significativa, lo que indicaría que la relación con el PIB es bastante débil. En el caso del CH_4 , se observa una correlación negativa y cercana a -1 , lo que indica que el crecimiento en las emisiones de este contaminante sigue una trayectoria totalmente opuesta a la del PIB per cápita, como se evidencia en los gráficos¹².

¹²Ver Anexos del 1 al 7.

Esto sugiere otra motivación para continuar el estudio de la posible relación de largo plazo entre crecimiento económico y contaminación.

4 Estrategia Empírica

En esta sección se presentan las metodologías empleadas en esta investigación. En primera instancia se muestra el modelo teórico base, cuya finalidad es demostrar que las hipótesis planteadas están justificadas en base a la teoría económica. Posteriormente, se presentan modelos empíricos a emplear para realizar las estimaciones, mencionando sus respectivas limitaciones en caso de existir.

Cabe resaltar que el tipo de metodologías trabajadas en el presente artículo tiene un enfoque de series de tiempo, principalmente para evitar los problemas señalados por Stern (2017)¹³ y porque el análisis se realizará exclusivamente para el caso de Chile.

4.1 Modelo Teórico Base

La relación entre ingreso y contaminación puede ser lógica e intuitiva, pero además tiene sus fundamentos en la teoría económica, como se plantea en Andreoni y Levinson (2001). En este trabajo se deriva la relación entre ingreso y contaminación en el largo plazo siguiendo la propuesta de estos autores.

Los autores comienzan proponiendo una economía de un agente representativo con una función de utilidad U que depende del consumo y la contaminación, donde esta última depende del consumo y los esfuerzos para reducir la contaminación. Además existe un ingreso (M) que se distribuye entre consumo y esfuerzo para combatir contaminación.

$$U = U(C, P) = C - zP \quad (2)$$

$$P = P(C, E) = C - C^\alpha E^\beta \quad (3)$$

$$C + E = M \quad (4)$$

La función de utilidad es lineal el consumo (C) y contaminación (P), además $z > 0$, pero para simplificar se usa $z = 1$ lo que no cambia las conclusiones finales. Así, tomando las ecuaciones (2), (3) y (4) se plantea el problema de maximización de utilidad:

$$\text{Max } U = C^\alpha E^\beta \text{ con respecto a } C + E = M \quad (5)$$

$$C^* = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} M \quad (6)$$

¹³Ver Sección 2, Revisión de Literatura.

$$E^* = \frac{\beta}{\alpha + \beta} M \quad (7)$$

Luego el nivel de contaminación óptimo se obtiene haciendo el reemplazo de (6) y (7) en (3):

$$P^*(M) = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} M - \left(\frac{\alpha}{\alpha + \beta}\right)^\alpha \left(\frac{\beta}{\alpha + \beta}\right)^\beta M^{(\alpha + \beta)} \quad (8)$$

Con la función de contaminación óptima pueden calcularse la primera y segunda derivada.

$$\frac{\partial P^*(M)}{\partial M} = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} - (\alpha + \beta) \left(\frac{\alpha}{\alpha + \beta}\right)^\alpha \left(\frac{\beta}{\alpha + \beta}\right)^\beta M^{(\alpha + \beta - 1)} \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 P^*(M)}{\partial M^2} = -(\alpha + \beta - 1)(\alpha + \beta) \left(\frac{\alpha}{\alpha + \beta}\right)^\alpha \left(\frac{\beta}{\alpha + \beta}\right)^\beta M^{(\alpha + \beta - 2)} \quad (10)$$

Basándose en la primera (9) y segunda (10) derivada de la contaminación respecto al ingreso es posible notar ciertos puntos relevantes. El primero corresponde al hecho que si $\alpha + \beta = 1$, el esfuerzo para contaminar tiene rendimientos constantes a escala. Segundo, la concavidad de la función de contaminación con respecto a los ingresos depende α y β , por lo que si $\alpha + \beta < 1$ la función será convexa y la tecnología usada para combatir la contaminación tendrá rendimientos decrecientes a escala, mientras que con $\alpha + \beta > 1$ la función será cóncava y la tecnología presentará retornos crecientes a escala.

El modelo puede generalizarse a múltiples agentes, permitiendo la existencia de externalidades, y las conclusiones finales siguen en la misma línea de lo anterior.

La modelación teórica de Andreoni y Levinson (2001) propone la posibilidad de representar la contaminación como una variable dependiente del ingreso desde una perspectiva económica. Los parámetros del modelo teórico, denotados como α y β , permiten establecer que la función que describe la relación entre contaminación e ingresos puede ser cóncava o convexa. Esta formulación teórica abre la puerta para investigar si dicha función es lineal, cuadrática, convexa, cóncava, entre otras posibilidades. Además, la ecuación (9) del modelo, que ilustra la pendiente de la EKC, sugiere que los parámetros¹⁴ α y β son claves para determinar la elasticidad, la cual puede ser estimada en un contexto empírico.

4.2 Modelo Empírico Base

Empleando lo propuesto por el modelo teórico y la literatura relacionada, la contaminación se asumirá como una función dependiente de los ingresos per cápita:

¹⁴Recordando que estamos empleando una función Cobb-Douglas, el parámetro β , cuanto mayor sea, es decir, cuanto más importancia relativa tenga el esfuerzo por combatir la contaminación, más probable es que la elasticidad ingreso-contaminación sea negativa.

$$Contaminacion_t = f(PIB_t, PIB_t^2) \quad (11)$$

Con una forma funcional log-lineal se procede a realizar las estimaciones, ya que simplifica la obtención de las elasticidades y al mismo tiempo permite ver de forma más simple si existen rendimientos decrecientes por parte del ingreso en los niveles de contaminación. Así es que se propone la siguiente ecuación para comprobar si existe una relación de largo entre contaminantes e ingreso, y al mismo tiempo, si se cumple la hipótesis de la EKC :

$$Ln(Pol_t^{pc}) = \beta_0 + \beta_1 Ln(PIB_t^{pc}) + \beta_2 Ln^2(PIB_t^{pc}) + X_t' \gamma + \epsilon_t \quad (12)$$

Donde $Ln(Pol_t^{pc})$ corresponde al logaritmo de las emisiones de un gas contaminante per cápita en el año t . $Ln(PIB_t^{pc})$ corresponde al logaritmo del PIB Real per cápita en el año t . $Ln^2(PIB_t^{pc})$ corresponde al logaritmo al cuadrado del PIB Real per cápita en el año t . X_t' es un vector de variables de control como el Comercio como porcentaje del PIB en el año t y otras variables económicas relevantes ya mencionadas anteriormente, en el año t . Por último se encuentra el término de error del año t denominado ϵ_t .

Se debe notar que la interpretación de los β es de elasticidades, puesto que por definición $\frac{\partial Ln(Y)}{\partial Ln(X)}$ es una elasticidad. En consecuencia, para el cumplimiento de las hipótesis planteadas se requiere que :

- Para la primera hipótesis se esperaría que $\beta_1 \neq 0 \cup \beta_2 \neq 0$, es decir, que exista una relación significativa entre contaminación e ingresos.
- Para el cumplimiento de la EKC se tiene que dar que $\beta_1 > 0$ y $\beta_2 < 0$.

4.2.1 Limitaciones del modelo anterior

La literatura plantea como base las ecuaciones anteriores para comprobar las respectivas hipótesis. Sin embargo, estas presentan diversos problemas que hacen que las estimaciones y conclusiones no sean fiables.

- **Auto correlación de errores**

Como se aprecia en la **Tabla 4**, los resultados contienen el Estadístico Durbin-Watson y el valor P del test Durbin alternativo. Para el caso del test de Durbin alternativo, este se plantea de la siguiente forma: $\epsilon_t = \rho_1 \epsilon_{t-1} + \dots + \rho_p \epsilon_{t-p} + v_t$ donde $H_0 : \rho_1 = 0 \dots \rho_p = 0$.

En las tablas mencionadas se observa que es estadísticamente significativo (se rechaza la hipótesis nula) en todo los casos. Lo que implica que existe correlación entre los errores.

Además que el estadístico de Durbin Watson toma valores muy bajos, lo que implica que hay correlación serial. Afectando a la inferencia estadística de los coeficientes.

- **Regresión Espuria y variables no Estacionarias**

Al observar la **Tabla 4** se aprecia que el R^2 *Ajustado* toma valores muy altos, lo que indica que el modelo se ajusta excesivamente bien. Sin embargo, podemos estar en presencia de regresiones espurias, las cuales suelen darse entre variables que pueden no tener relación alguna, pero entregan un supuesto efecto causal, ya que correlación no implica causalidad necesariamente.

Lo más probable es que como las series de contaminación por CO_2 (incluyendo otros contaminantes) y PIB Real crecen a lo largo del tiempo, se obtienen resultados que parecieran indicar un buen ajuste. Lo anterior suele darse en series temporales que no presentan un comportamiento estacionario¹⁵, lo cual viola los supuestos de las estimaciones por Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) y lleva a una inferencia estadística errónea.

En particular, el tratar este problema permite encontrar si realmente las variables de interés tienen una relación de largo plazo.

Existen metodologías alternativas que permiten superar algunos de estos potenciales problemas y obtener resultados con una mejor inferencia estadística. Este tema se aborda en la siguiente subsección.

4.3 Modelo de Rezagos Autorregresivos Distribuidos (ARDL) con Análisis de Cointegración

Una vía para solucionar los problemas mencionados en el tópico anterior, es utilizar el modelo de Rezagos Autorregresivos Distribuidos (ARDL¹⁶) con un análisis de cointegración, propuesto por Pesaran y Shin (1999). El modelo se caracteriza por tomar el modelo ARDL tradicional, pero permitiendo la incorporación de variables cuyo orden de integración sea $I(1)$ ¹⁷. Este modelo, soluciona el mayor problema asociado con el manejo de variables no estacionarias, lo que nos permite tener una mejor inferencia estadística. También, se encarga de autocorrelación serial y mitiga la endogeneidad en las estimaciones al incorporar rezagos de las variables.

Asimismo, el modelo de Pesaran y Shin (1999) se complementa con la metodología de Corrección de Errores (ECM) de Engle y Granger (1987), que facilita el análisis de cointegración y corrige el sesgo en las estimaciones al integrar en un solo modelo las dinámicas de corto y largo plazo entre las variables de interés.

¹⁵Ver Anexo 8 de la sección de anexos. Los resultados del test de Dickey-Fuller ilustran que las variables en niveles no son estacionarias.

¹⁶Siglas en inglés.

¹⁷Variables no estacionarias en niveles.

$$\Delta Y_t = \beta_0^E + \beta_1^E \Delta Y_{t-1} + \beta_2^E \Delta X_t + \beta_3^E \Delta X_{t-1} + C' \gamma + \theta_1^E EC_{t-1} + \epsilon_t \quad (13)$$

La ecuación (13) representa el modelo base que combina tanto el enfoque de Pesaran y Shin (1999) como la metodología de Engle y Granger (1987), que son comúnmente utilizados en la literatura sobre metodologías de series de tiempo. Y y X son variables cualquiera, dependiente e independiente respectivamente. Δ corresponde a la primera diferencia de la variable. El superíndice E se utiliza para ilustrar que se está ejemplificando. C es un vector de variables de control. Por último, EC_{t-1} corresponde al término de error de corrección. En lo que sigue, es necesario ilustrar los coeficientes de interés.

$$Y_t = \alpha X_t + v_t \quad (14)$$

$$EC_{t-1} = Y_{t-1} - \alpha X_{t-1} \quad (15)$$

La ecuación (14) corresponde a la estimación de largo plazo, pues incorpora las variables no estacionarias, mientras la (15) corresponde al término de corrección de error propuesto por Engle y Granger (1987), que es aquel que captura la dinámica de largo plazo en el modelo. Con esto, introduciendo (15) en (13):

$$\Delta Y_t = \beta_0^E + \beta_1^E \Delta Y_{t-1} + \beta_2^E \Delta X_t + C' \gamma + \theta_1^E (Y_{t-1} - \alpha X_{t-1}) + \epsilon_t \quad (16)$$

$$\Delta Y_t = \beta_0^E + \beta_1^E \Delta Y_{t-1} + \beta_2^E \Delta X_t + C' \gamma + \theta_1^E Y_{t-1} - \theta_1^E \alpha X_{t-1} + \epsilon_t \quad (17)$$

La ecuación (17) podemos reescribirla como:

$$\Delta Y_t = \beta_0^E + \beta_1^E \Delta Y_{t-1} + \beta_2^E \Delta X_t + C' \gamma + \theta_1^E Y_{t-1} + \theta_2^E X_{t-1} + \epsilon_t \quad (18)$$

$$-\frac{\theta_2^E}{\theta_1^E} = \alpha \quad (19)$$

La ecuación (18) corresponde a la estimación que se debe realizar de forma generalizada, mientras la ecuación (19) ilustra los coeficientes de interés para la estimación de largo plazo, $-\frac{\theta_2}{\theta_1}$, lo cual hace sentido al ser obtenido de las variables en niveles, es decir, no estacionarias, donde un shock en X , tiene un efecto permanente en Y . Por otro lado, el efecto de corto plazo es medido por β_2 , dado que un shock en ΔX afecta transitoriamente

a ΔY .

Considerando que con lo anterior obtenemos los coeficientes de interés, quedan pendientes las pruebas de hipótesis a realizar para llevar a cabo la inferencia estadística. En los modelos de series de tiempo, para comprobar la existencia de cointegración se emplean el test de Engle y Granger propuesto en Engle y Granger (1987) que consiste en tomar los residuos de la regresión en niveles y aplicar el test de Dickey-Fuller, para proceder con la estimación usando la corrección de errores. También el test de cointegración de Johansen propuesto por Johansen (1991), es empleado cuando se hace uso de modelos de Vectores Autorregresivos con corrección de error (VEEC).

En esta situación, se hará uso del ARDL Bound Test propuesto por Pesaran y Shin (2001), empleado por Udemba y Tosun (2022) y literatura relacionada. Esta prueba de hipótesis nos permitirá a través del empleo del modelo ARDL propuesto, de la ecuación (19), hacer la inferencia estadística necesaria para comprobar la existencia de una relación de largo plazo entre las variables de interés. El test emplea el estadístico F que se obtiene de la estimación de (19) y los umbrales definidos por los autores del test, donde la hipótesis nula es la no existencia de una relación de largo plazo. Los valores críticos del test corresponden a umbrales, donde si el estadístico F cae debajo del umbral crítico no se rechaza la nula, mientras que si cae por encima del umbral crítico se rechaza la nula y hay cointegración. Por último, si el estadístico cae dentro de los umbrales, el test es inconcluso respecto a la cointegración. Así, el test que definido como:

$$H_0 : \theta_1 = 0 \cap \theta_2 = 0 \text{ (No hay Cointegración)}$$

$$H_1 : \theta_1 \neq 0 \cup \theta_2 \neq 0 \text{ (Cointegración)}$$

La preferencia por este test radica en su ventaja al ser empleado con muestras pequeñas. Los tests para la relación de largo plazo, como el de Engle y Granger (1987) y el de Johansen, enfrentan dificultades cuando se utilizan con tamaños de muestra reducidos, lo que puede disminuir el poder de los tests. En este contexto, se emplean los valores críticos construidos por Narayan (2005), lo que proporciona una mayor fiabilidad en la inferencia estadística.

Aplicando la metodología propuesta para las hipótesis propuestas la ecuación que se plantea es la siguiente:

$$\Delta Ln(Pol_t) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_{1k} \Delta Ln(Pol_{t-i}) + \sum_{i=0}^j \beta_{2k} \Delta Ln(Pib_{t-i}) + \sum_{i=0}^p \beta_{3k} \Delta Ln(Pib_{t-i})^2 +$$

$$X'\gamma + \theta_1 \text{Ln}(\text{Pol}_{t-1}) + \theta_2 \text{Ln}(\text{Pib}_{t-1}) + \theta_3 \text{Ln}(\text{Pib}_{t-1})^2 + \mu T + D'\lambda + \epsilon_t \quad (20)$$

Donde $\text{Ln}(\text{Pol}_t)$ es el logaritmo natural del nivel de contaminación en t , $\text{Ln}(\text{Pib}_t)$ es el logaritmo natural del PIB real per cápita, X es un set variables de control. Además, se incorporan la tendencia y un vector de dummies que contiene los años entre cada quiebre estructural junto a la interacción con la tendencia para capturar los principales quiebres estructurales en tendencia ¹⁸.

Es factible observar que la ecuación (20), formulada para efectuar la estimación, incorpora rezagos de las variables de contaminación per cápita e ingreso per cápita. En consecuencia, la selección del número óptimo de rezagos se fundamenta principalmente en la necesidad de eliminar la autocorrelación serial, mantener la parsimonia del modelo y asegurar su calidad. Por lo tanto, para elegir el modelo más adecuado, se emplea el criterio de información bayesiano (BIC), el cual presenta la ventaja de penalizar más severamente la sobreparametrización.

En lo que respecta a las hipótesis propuestas, para que se cumpla la primera hipótesis se debe rechazar la hipótesis nula del test de co-integración propuesto y que tanto $\frac{\theta_2}{\theta_1}$ como $\frac{\theta_3}{\theta_1}$ sean estadísticamente significativos. Para que la hipótesis de la EKC se cumpla, se debe cumplir que $-\frac{\theta_2}{\theta_1} > 0$ y $-\frac{\theta_3}{\theta_1} < 0$, lo que es equivalente a $\theta_2 > 0$ y $\theta_3 < 0$, todo esto condicionado que se rechazó la hipótesis nula del test de cointegración.

$$H_0 : \theta_1 = 0 \cap \theta_2 = 0 \cap \theta_3 = 0 \text{ (No hay Cointegración)}$$

$$H_1 : \theta_1 \neq 0 \cup \theta_2 \neq 0 \cup \theta_3 \neq 0 \text{ (Cointegración)}$$

Por último, para la tercera hipótesis sobre en que parte de la curva se ubica Chile en cada contaminante, se debe calcular el “punto de inflexión” o punto de inflexión de ingresos, empleando los coeficientes de largo plazo estimados:

$$-\frac{\hat{\theta}_2}{\hat{\theta}_1} = \hat{\eta}_1 \quad \text{y} \quad -\frac{\hat{\theta}_3}{\hat{\theta}_1} = \hat{\eta}_2 \quad (21)$$

$$\text{Punto de Inflexión} = \text{Exp} \left(-\frac{\hat{\eta}_1}{2\hat{\eta}_2} \right) \quad (22)$$

¹⁸La definición de las dummies se hace por periodos, es decir, inicia con un quiebre y termina con el año del siguiente quiebre. Con esto se asume que cualquier shock externo que produjo el quiebre estructural, tiene un efecto distinto en cada periodo.

5 Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos con cada especificación y para los diversos gases contaminantes. Se incluyen los diagnósticos realizados a cada modelo para verificar la validez de los resultados. Se muestran pruebas como la de Breusch-Godfrey¹⁹, así como otras pruebas relevantes, como la prueba de Jarque-Bera²⁰ y la prueba de Ruido Blanco²¹ para asegurar que los residuos de las regresiones cumplen con los supuestos necesarios para una correcta inferencia estadística.

5.1 Resultados del modelo MCO

En la Tabla 4 se presentan los resultados de la estimación por MCO. Se puede apreciar que las variables del PIB per cápita son estadísticamente significativas.

Tabla 4: Estimaciones por MCO del logaritmo de la emisiones per cápita usando el logaritmo del PIB

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	CO_2	SO_2	CH_4	GEI	NO_X	$MP2.5$	$MP10$	N_2O
$Ln(PIB)$	-6.667*** (-5.44)	-7.355** (-2.33)	2.713*** (2.74)	-4.903*** (-6.41)	2.214* (1.72)	4.060** (2.55)	6.747*** (4.05)	5.646*** (5.92)
$Ln^2(PIB)$	0.444*** (6.42)	0.413** (2.31)	-0.150** (-2.69)	0.330*** (7.65)	-0.070 (-0.97)	-0.200** (-2.23)	-0.342*** (-3.64)	-0.297*** (-5.51)
Tendencia	-0.019*** (-6.34)	0.003 (0.35)	-0.008*** (-3.27)	-0.020*** (-10.65)	-0.013*** (-4.04)	0.007 (1.67)	0.004 (0.89)	-0.006** (-2.52)
<i>Observaciones</i>	49	49	49	49	49	49	49	49
R^2 Ajustado	0.951	0.072	0.737	0.945	0.933	0.928	0.937	0.776
Durbin-Watson	0.544	0.316	0.415	0.809	0.676	0.572	0.685	0.554
P-value BG Test ²²	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

valores t en paréntesis

* $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$

Con esto podemos deducir a priori que se cumple la hipótesis de la EKC en algunos de los contaminantes como el CH_4 , el material particulado y el N_2O . Pero hay que tener en cuenta que es muy posible que las estimaciones estén sesgadas, ya que no incorporan la dinámica de corto plazo entre estas variables. Además, hay problemas de inferencia

¹⁹Prueba de correlación serial; la hipótesis nula es que no hay correlación serial.

²⁰Prueba para evaluar el comportamiento de una distribución normal; la hipótesis nula es que la variable sigue una distribución normal.

²¹Prueba para corroborar que los residuos son ruido blanco.

estadística, por el uso de variables no estacionarias y efectivamente el R^2 es mayor que el estadístico Durbin Watson indicando correlación espuria y el test de Breusch-Godfrey muestra que hay correlación serial en todos los casos.

5.2 Resultados del Modelo ARDL con análisis de cointegración para la EKC

Esta subsección ilustra los resultados que se obtienen, donde lo primero que se debe mencionar, es que tanto para las tablas 5, 6 y 7 los resultados se agrupan en paneles que toman 4 casos en las que se estimaron los modelos. En el panel A se hace elige el modelo en base al criterio de información BIC, en el panel B se hace la estimación del modelo de forma arbitraria con 2 rezagos en cada variable, en el panel C lo mismo que el anterior pero añadiendo variables de control de consumo energético y el panel D que cambia las variables de control energéticas por variables económicas²³.

Previo a analizar si los resultados del modelo cumplen con cada hipótesis, es fundamental verificar la existencia de una tendencia estocástica a largo plazo entre nuestras variables de interés, lo que se logra a través del test propuesto por Pesaran y Shin (2001), cuyos resultados se encuentran en la Tabla 5.

Los resultados del test de cointegración son bastante variados y la robustez se presenta solo en algunos de ellos. En el caso del CO_2 el test de cointegración apunta a la presencia de cointegración en la mayoría de casos a excepción del Panel D, lo que permite concluir que esta variable cointegra con el PIB per capita. En el resto de contaminantes globales, la evidencia es poco para el CH_4 y el N_2O , pero los GEI si presentan evidencia favorable de cointegración.

Para los contaminantes locales, los que muestran mayor evidencia de cointegración son el SO_2 y el NO_x . Los materiales particulados muestran evidencia favorable, pero es menos robusta y queda más al margen de la especificación.

En términos generales, al evaluar la no cointegración, es crucial considerar la relevancia de la especificación, especialmente en contextos de series temporales donde pequeños cambios en los datos o la inclusión de variables adicionales pueden alterar significativamente los resultados. Por ende, se dará mayor peso a los hallazgos obtenidos en el primer panel.

²³No se añaden todas las variables de control en conjunto dado que se desea evitar la sobreparametrización.

Tabla 5: Resultados del test de cointegración empleado con distintos niveles de significancia

	(1) <i>CO₂</i>	(2) <i>SO₂</i>	(3) <i>CH₄</i>	(4) GEI	(5) <i>NO_x</i>	(6) PM25	(7) PM10	(8) <i>N₂O</i>
Panel A: Criterio BIC								
Decisión al 10%	Cointegran	Cointegran	No	Cointegran	Cointegran	Cointegran	Cointegran	Cointegran
Decisión al 5%	Inconcluso	Cointegran	No	Cointegran	Cointegran	Cointegran	Inconcluso	Cointegran
Decisión al 1%	No	Cointegran	No	Cointegran	Cointegran	Inconcluso	No	Inconcluso
Panel B: 2 Rezagos								
Decisión al 10%	Cointegran	Cointegran	Inconcluso	Cointegran	Cointegran	Inconcluso	Cointegran	Inconcluso
Decisión al 5%	Cointegran	Cointegran	No	Cointegran	Cointegran	Inconcluso	Inconcluso	No
Decisión al 1%	Inconcluso	Cointegran	No	Cointegran	Cointegran	No	No	No
Panel C: 2 Rezagos + Controles Energéticos								
Decisión al 10%	Cointegran	Cointegran	No	Inconcluso	Cointegran	No	No	No
Decisión al 5%	Cointegran	Cointegran	No	Inconcluso	Cointegran	No	No	No
Decisión al 1%	Inconcluso	Cointegran	No	No	Cointegran	No	No	No
Panel D: 2 Rezagos + Controles Económicos								
Decisión al 10%	No	Cointegran	Cointegran	Cointegran	Cointegran	No	No	Inconcluso
Decisión al 5%	No	Cointegran	Cointegran	Inconcluso	Cointegran	No	No	No
Decisión al 1%	No	Cointegran	Cointegran	No	Cointegran	No	No	No

La Tabla 6 ilustra los resultados del modelo ARDL empleando la especificación tradicional. En una primera instancia, más que el valor de los coeficientes en si, interesa en particular, el signo de los coeficientes y su significancia estadística para corroborar la existencia de una relación de largo plazo.

En el Panel A, empleando el criterio BIC para los rezagos, podemos apreciar que hay significancia estadística al 5% para el CO_2 , SO_2 , NO_x , PM2.5 y el PM10. En el caso de los Paneles B, C y D, la significancia es más variable, pero la evidencia más fuerte se da para el NO_x que mantiene la significancia de ambos coeficientes en casi todos los escenarios. Le siguen los materiales particulados y el CO_2 que tiende a variar la significancia sobre todo al añadir variables de control, aunque la variación de los coeficientes es muy poca. En resumen, los contaminantes que muestran una relación de largo plazo son el CO_2 , NO_x , SO_2 , el PM2.5 y el PM10.

Ya teniendo las relaciones de largo plazo, es posible ver el cumplimiento o no de la hipótesis de la EKC, a través de los signos de los coeficientes estimados. Los cuatro Paneles de la Tabla 6 indican que el CO_2 no cumple la EKC, más aún, la curva tiene forma de U, lo que implica que en el largo plazo la contaminación por dióxido de carbono seguirá aumentando y no se desacoplará del crecimiento económico.

Por otro lado, los contaminantes locales presentan en general una evidencia más favorable de la EKC, tanto para los dos materiales particulados como el SO_2 . En estos tres contaminantes locales los resultados apuntan a una curva con forma de U invertida, ilustrando que en el largo plazo las emisiones de tales contaminantes se van desacoplando del crecimiento económico. El NO_x presenta fuerte evidencia del no cumplimiento de la EKC, donde incluso también se observa evidencia de una curva con forma U, es decir, se espera que las emisiones de NO_x sigan incrementándose hacia el largo plazo de la mano del aumento del ingreso per cápita.

Tabla 6: Resultados de estimaciones a través de modelo ARDL

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	CO_2	SO_2	CH_4	GEI	NO_x	PM25	PM10	N_2O
Panel A: Criterio BIC								
<i>Largo Plazo</i>								
$Ln(PIB)$	-20.164**	6.451**	28.947	-5.669	-5.334***	8.621**	12.757**	0.761
	(-2.30)	(2.38)	(0.77)	(-1.45)	(-3.00)	(2.53)	(2.66)	(0.34)
$Ln^2(PIB)$	1.218**	-0.363**	-1.677	0.377	0.347***	-0.475**	-0.710**	-0.033
	(2.34)	(-2.33)	(-0.76)	(1.60)	(3.45)	(-2.46)	(-2.59)	(-0.25)
<i>Observaciones</i>	45	45	45	45	45	45	45	45
R^2 Ajustado	0.525	0.632	0.635	0.500	0.627	0.265	0.238	0.361
Panel B: 2 Rezagos								
<i>Largo Plazo</i>								
$Ln(PIB)$	-10.725*	9.320*	18.048*	-2.305	-3.411	8.239*	11.092**	1.835
	(-1.70)	(1.97)	(1.86)	(-0.76)	(-1.48)	(1.73)	(2.21)	(0.66)
$Ln^2(PIB)$	0.665*	-0.533*	-1.044*	0.173	0.247*	-0.460*	-0.617**	-0.092
	(1.75)	(-1.95)	(-1.83)	(0.94)	(1.90)	(-1.73)	(-2.18)	(-0.55)
<i>Observaciones</i>	47	47	47	47	47	47	47	47
R^2 Ajustado	0.523	0.604	0.524	0.543	0.621	0.316	0.260	0.338
Panel C: 2 Rezagos + Controles Energéticos								
<i>Largo Plazo</i>								
$Ln(PIB)$	-7.849	2.853	-122.867	-1.713	-6.795***	-5.639	13.990	-2.784
	(-1.32)	(1.01)	(-0.27)	(-0.39)	(-3.35)	(-0.21)	(0.64)	(-0.62)
$Ln^2(PIB)$	0.482	-0.148	6.885	0.162	0.433***	0.261	-0.828	0.177
	(1.35)	(-0.91)	(0.27)	(0.60)	(3.79)	(0.18)	(-0.68)	(0.68)
<i>Observaciones</i>	41	45	45	41	41	41	41	41
R^2 Ajustado	0.781	0.824	0.804	0.819	0.863	0.764	0.744	0.602
Panel D: 2 Rezagos + Controles Económicos								
<i>Largo Plazo</i>								
$Ln(PIB)$	-39.658	1.264	7.683*	-4.284	-5.589**	8.677*	11.834**	4.825
	(-1.33)	(0.27)	(2.06)	(-0.88)	(-2.66)	(1.70)	(2.16)	(1.68)
$Ln^2(PIB)$	2.347	-0.057	-0.422*	0.320	0.361***	-0.479	-0.652**	-0.244
	(1.35)	(-0.21)	(-1.92)	(1.09)	(3.04)	(-1.64)	(-2.08)	(-1.51)
<i>Observaciones</i>	42	42	42	42	42	42	42	42
R^2 Ajustado	0.503	0.698	0.747	0.652	0.623	0.341	0.282	0.772

Valores t en los paréntesis. * $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$

Es posible también calcular las elasticidades, pero siempre teniendo en cuenta que estamos ante una relación cuadrática, por lo que la elasticidad de largo plazo dependerá de los coeficientes y del nivel de ingresos per cápita. Dado lo anterior, la ecuación de la elasticidad de largo plazo, teniendo en cuenta los coeficientes de interés ya definidos en la sección de metodología, η_1 y η_2 , se define como:

$$\varepsilon_{LP} = \eta_1 + 2\eta_2 \ln(PIB) \quad (23)$$

La elasticidad ingreso-emisiones del CO_2 , tomando como referencia el ingreso per cápita del año 2000, es de un 1.89%, mientras que tomando como punto de referencia de ingreso el 2016, la elasticidad de largo plazo es de aproximadamente un 3%, lo que evidencia que Chile ya se encuentra en la parte creciente de la curva con forma de U.

Por el lado de los contaminantes locales, para el SO_2 usando como punto de referencia el año 2000, la elasticidad de largo plazo toma un valor de -0.12% mientras que tomando como referencia el 2016, el valor disminuye a un -0.46%. El material particulado de 2.5 micro gramos tiene una elasticidad de 0.02% en el 2000 disminuyendo a -0.42% en el 2016 y el material particulado de 10 micro gramos tiene una elasticidad de -0.09% en el 2000 disminuyendo a -0.76% en el 2016. Por ultimo, el NO_x para el año 2000 tiene una elasticidad de 0.95% y el año 2016 se incrementa a un 1.27%.

Las elasticidades anteriores ilustran que en el caso de contaminantes como SO_2 , y los materiales particulados, el crecimiento del ingreso per capita ya está logrando impactar en forma negativa los niveles de emisión. Por el contrario, en el caso del CO_2 y el NO_x la contaminación no ha logrado desacoplarse del crecimiento económico, puesto que los niveles de emisión actualmente siguen incrementándose frente a incrementos permanentes del ingreso.

Las pruebas de diagnóstico de la Tabla 7 sugieren que las especificaciones a priori están bien, donde para una mayoría de los casos no se puede rechazar la hipótesis nula de que los errores son ruido blanco, estacionarios sin autocorrelación y con una distribución normal.

Tabla 7: Resultados de test de diagnóstico de los modelos

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	CO_2	SO_2	CH_4	GEI	NO_x	PM2.5	PM10	N_2O
Panel A: Criterio BIC								
Correlación Serial	0.000	0.928	0.136	0.000	0.105	0.650	0.000	0.169
Jarque-Bera	0.743	0.071	0.950	0.535	0.796	0.003	0.001	0.698
Ruido Blanco	0.577	0.145	0.436	0.648	0.221	0.949	0.977	0.483
Panel B: 2 Rezagos								
Correlación Serial	0.078	0.770	0.186	0.231	0.209	0.401	0.562	0.107
Jarque-Bera	0.655	0.015	0.511	0.236	0.939	0.005	0.003	0.318
Ruido Blanco	0.847	0.103	0.491	0.596	0.004	0.947	0.988	0.749
Panel C: 2 Rezagos + Controles Energéticos								
Correlación Serial	0.545	0.000	0.034	0.499	0.000	0.000	0.007	0.551
Jarque-Bera	0.916	0.653	0.361	0.447	0.005	0.152	0.663	0.253
Ruido Blanco	0.773	0.011	0.016	0.589	0.353	0.404	0.296	0.811
Panel D: 2 Rezagos + Controles Económicos								
Correlación Serial	0.000	0.044	0.000	0.148	0.020	0.000	0.000	0.066
Jarque-Bera	0.159	0.824	0.424	0.244	0.237	0.005	0.000	0.570
Ruido Blanco	0.947	0.362	0.016	0.719	0.698	0.867	0.953	0.898

Los puntos de inflexión para los contaminantes que cumplen con tener una relación cuadrática en el largo plazo, son los siguientes:

- Para el CO_2 el “punto de inflexión” de ingresos per cápita son los $US\$ 3930$, logrado en 1967 aproximadamente.
- Para el NO_x el “punto de inflexión” que lleva a incrementos en la contaminación producto del crecimiento del ingreso, es de aproximadamente de $US\$ 2177$ logrado mucho antes de los años 60s.
- En el caso del SO_2 , el “punto de inflexión” se ubica en los $US\$ 7227$, evidenciado aproximadamente en 1995.
- Los materiales particulados de 2.5 y 10 micro gramos se estima que su “punto de inflexión” se ubica aproximadamente en los $US\$ 5977$ y $US\$ 7972$ entre los años 1991-1992 y 1996-1997, respectivamente.

En resumen, para la tercera hipótesis podemos corroborar que para 3 de los 4 contaminantes locales el punto de inflexión ya fue alcanzado y los niveles de contaminación van decreciendo.

6 Limitaciones y futura investigación

En esta sección se mencionan ciertas limitaciones en torno a la investigación, principalmente metodológicas que deben tenerse en consideración al interpretar los resultados. Esto implica que este es un tema en el que se debe continuar investigando en el futuro.

La primera posible limitación se asocia al modelo ARDL y la prueba de cointegración propuesta por Pesaran y Shin (2001), donde los autores utilizan como supuesto para derivar el test que la relación entre las variables es unidireccional. Es decir, asumen que no hay causalidad simultánea entre las variables, lo que implica que en el estudio se considera que el ingreso causa la contaminación y no al revés. Si este supuesto no se cumple, las estimaciones podrían estar sesgadas y sería necesario emplear otras metodologías para tratar la endogeneidad.

La evidencia sobre la causalidad en la relación de largo plazo entre la contaminación y el ingreso per cápita, en particular sobre si realmente la contaminación puede afectar el crecimiento económico. Azam et al. (2016) busca el impacto de la contaminación por CO_2 en el crecimiento económico, encontrando que este afecta positivamente en el caso de Estados Unidos, Japón y China, mientras para la India es negativo, siendo en todos los casos estadísticamente significativos. Por otro lado, Coondoo y Dinda (2002) a través de datos de panel buscan comprobar cuál es la direccionalidad entre contaminación por CO_2 e ingreso per cápita, encontrando resultados mixtos, en particular para latinoamérica hallan causalidad unidireccional del ingreso hacia la contaminación.

La segunda posible limitación corresponde al número de observaciones, donde al trabajar con datos anuales la muestra disminuye considerablemente respecto a un caso de mayor frecuencia. Este punto podría afectar la inferencia estadística restándole poder a las pruebas de hipótesis. No obstante, Pesaran y Shin (1999) demuestran que los parámetros de largo plazo son súper consistentes aún en muestras pequeñas. Del mismo modo, la prueba de cointegración propuesta por Pesaran y Shin (2001) también es fiable al usar los valores críticos de Narayan (2005).

La tercera limitación apunta al hecho de que no todas las variables usadas sean estacionarias y más aún que sean $I(1)$. Este punto se enfoca en el caso de no linealidades, ya que estas pueden alterar completamente los supuestos a la hora de modelar series de tiempo. Berenguer y Gonzalo (2013) argumentan que es posible que las no linealidades en series de tiempo no necesariamente cumplan con ser variables $I(0)$ o $I(1)$, lo cual demuestran matemáticamente en un proceso de camino aleatorio :

$$\pi_t = \pi_{t-1} + \varepsilon_t \quad (24)$$

$$\pi_t^2 = \pi_{t-1}^2 + 2\pi_{t-1}\varepsilon_t + \varepsilon_t^2 \quad (25)$$

$$V(\pi_t^2 - \pi_{t-1}^2) = 4(t-1)\sigma_\varepsilon^4 + E(\varepsilon_t^4) \quad (26)$$

Con la ecuación (26), ilustran que π_t^2 no es $I(1)$ y $\Delta\pi_t^2$ no es estacionario, lo que podría afectar los supuestos de estacionariedad y resultados de las pruebas de cointegración.

En lo que refiere a investigaciones futuras, el tópico es bastante amplio para seguir estudiándolo, empleando otros tipos de contaminantes distintos de los atmosféricos y, de ser posible, usar más datos para abarcar un periodo de tiempo más largo. Adicionalmente, lo más criticado en el tópico referente a la EKC es la falta de robustez en las estimaciones y los posibles problemas econométricos dependiendo de la especificación usada como plantea Stern (2004).

7 Conclusión

El presente estudio, a través del uso de datos de la EDGAR y del Banco Mundial, estimó el efecto y relación de largo plazo del crecimiento económico en la contaminación atmosférica, usando como *proxy* de esta los niveles de emisión de algunos gases y aerosoles.

Los resultados que se obtienen permiten concluir que el cumplimiento de las hipótesis de esta investigación depende del contaminante: (1) La primera hipótesis de la relación de largo plazo se cumple para el CO_2 , SO_2 , NO_x y los materiales particulados, (2) para la hipótesis sobre el cumplimiento de la EKC, hay evidencia favorable para 3 de los 4 contaminantes locales, el SO_2 y los materiales particulados y (3) sobre la última hipótesis, la evidencia ilustra que los puntos inflexión ya fueron alcanzados en los contaminantes locales, donde a excepción del NO_x , los ingresos ya tienen efectos negativos en la polución per cápita.

El cumplimiento de las diversas hipótesis para algunos contaminantes, sugiere que se hicieron esfuerzos para combatir los contaminantes en cuestión, ya sea a través de políticas o por mejoras en la tecnología. Siguiendo la idea de Dinda (2002), los principales mecanismos presentes que justifican tanto la relación de largo plazo como el cumplimiento de la EKC apuntan a un **efecto escala**, donde inicialmente a medida que más se produce más recursos se consumen y más desechos se generan. No obstante, a medida que van creciendo los ingresos se presentan otros dos efectos: (1) el **efecto composición**, que apunta a un cambio en la estructura de la economía, migrando de sectores intensivos en energía a otros como servicios y cambios en las preferencias de los consumidores que valoran más el cuidado del medio ambiente, y (2) el **efecto técnico** asociado al uso de tecnologías más eficientes, producto del uso de tecnologías más modernas disponibles en el mercado mundial o de mayor inversión.

Los puntos de inflexión encontrados para los contaminantes locales que sí cumplen la EKC son $US\$ 7227$ (SO_2), $US\$ 5977$ (PM2.5) y $US\$ 7972$ (PM10), donde tales niveles de ingresos per cápita se lograron a mediados de los años 90's. Durante esa década se fundó la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) como órgano encargado de políticas medioambientales, tales como la dictación de normas la creación de normas primarias y secundarias para emisiones y concentraciones de contaminantes. Previamente en 1978 ya se habían establecido normas primarias de calidad del aire sobre las emisiones de SO_2 y materiales particulados, y en 1992, a través del ministerio de minería, se genera un decreto²⁴ que busca controlar las emisiones de los contaminantes locales de las principales fuentes como explotaciones mineras y fundiciones. Además, las diversas normas de calidad del aire se revisan constantemente para ir ajustando umbrales de niveles de concentración,

²⁴Decreto 185, ver <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=10631>.

evaluar el impacto ambiental y diseñar planes de descontaminación, lo que explica los resultados obtenidos para el caso de contaminantes como el SO_2 y los materiales particulados.

Al contrario, para el CO_2 y NO_x los puntos de inflexión ya fueron alcanzados previo a 1960 según las estimaciones. Los principales contribuyentes a estos resultados provienen de parte del sector industrial y energético, como las termoeléctricas y el transporte, siendo este último el que más presencia tiene en la región metropolitana (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, 2022). Además, la CEPAL y la OCDE (2005) menciona que gran parte de los incrementos desde los años 90's del NO_x se debe a un mayor uso de combustibles por parte de fuentes fijas y a un mayor tráfico vehicular. Ahora, el mayor tráfico vehicular es esperable que haya seguido una tendencia al alza, ya que el incremento de ingresos mejoró la accesibilidad de la población a vehículos particulares, pero no lo suficientemente amigables con el medio ambiente.

La importancia de la presente investigación es que sienta las bases para futuros estudios en un tópico que si bien es relevante y con abundante literatura a nivel mundial, en Chile los estudios son escasos. Además, estudios previos se han enfocado en el CO_2 , mientras este estudio añade contaminantes locales que suelen ser más dañinos para la salud. Por último, los resultados indican que se ha logrado cierta efectividad para combatir los contaminantes locales.

Para concluir, el presente estudio logra encontrar relaciones de largo plazo entre contaminantes y los ingresos, y evidencia favorable de la EKC para contaminantes locales donde Chile ya se encuentra en la parte decreciente de la curva al disminuir las emisiones. Aquellos contaminantes que no cumplen la EKC exigen poner atención y eventualmente diseñar políticas públicas para desacoplar sus emisiones del crecimiento económico.

8 Referencias

- Akan, T., Gündüz, H. İ., Vanlı, T., Zeren, A. B., Işık, A. H., & Mashadihasanli, T. (2022). Why are some countries cleaner than others? New evidence from macroeconomic governance. *Environment, Development and Sustainability*, 1-57.
- Andreoni, J., Levinson, A. (2001). The simple analytics of the environmental Kuznets curve. *Journal of public economics*, 80(2), 269-286.
- Arminen, H., Menegaki, A. N. (2019). Corruption, climate and the energy-environment-growth nexus. *Energy Economics*, 80, 621-634.
- Azam, M., Khan, A. Q., Abdullah, H. B., Qureshi, M. E. (2016). The impact of CO 2 emissions on economic growth: evidence from selected higher CO 2 emissions economies. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 6376-6389.
- Berenguer-Rico, V., Gonzalo, J. (2014). Summability of stochastic processes—A generalization of integration for non-linear processes. *Journal of Econometrics*, 178, 331-341.
- Bhagwati, J. (1993). The case for free trade. *Scientific American*, 269(5), 42-49.
- Bharadwaj, P., Gibson, M., Zivin, J. G., Neilson, C. (2017). Gray matters: Fetal pollution exposure and human capital formation. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 4(2), 505-542.
- Beckerman, W. (1992). Economic development and the environment: conflict of complementarity? (No. 961). The World Bank.
- Bullard R. D. (2011). Sacrifice Zones: The Front Lines of Toxic Chemical Exposure in the United States. *Environmental Health Perspectives*, 119(6), A266.
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia. (2022). Realizan el primer y más detallado mapa de la contaminación en Chile: sector residencial es responsable de más del 90% de las emisiones (La Tercera) — Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia - CR2. <https://www.cr2.cl/realizan-el-primer-y-mas-detallado-mapa-de-la-contaminacion-en-chile-sector-residencial-es-responsable-de-mas-del-90-de-las-emisiones-la-tercera/>: :text=De%20hecho%2C%20dentro%20del%20%C3%A1rea
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe & Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (2005). Evaluaciones del desempeño ambiental: Chile. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/ce231b7f-17ef-40fc-be71-2b992fbd1fa9/content>

- Coondoo, D., Dinda, S. (2002). Causality between income and emission: a country group-specific econometric analysis. *Ecological Economics*, 40(3), 351-367.
- Contaminación atmosférica se mantiene como el principal problema ambiental del país y el uso de leña aparece como la actividad más dañina para el aire. (2017, April 10). Mma.gob.cl. <https://mma.gob.cl/contaminacion-atmosferica-se-mantiene-como-el-principal-problema-ambiental-del-pais-y-el-uso-de-lena-aparece-como-la-actividad-mas-danina-para-el-aire/>: :text=Respecto
- Dasgupta, S., Laplante, B., Wang, H., Wheeler, D. (2002). Confronting the environmental Kuznets curve. *Journal of economic perspectives*, 16(1), 147-168.
- Dilmore, R., Zhang, L. (2018). Greenhouse gases and their role in climate change. *Greenhouse Gases and Clay Minerals: Enlightening Down-to-Earth Road Map to Basic Science of Clay-Greenhouse Gas Interfaces*, 15-32.
- Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets curve hypothesis: a survey. *Ecological economics*, 49(4), 431-455.
- Engle, R. F., Granger, C. W. (1987). Co-integration and error correction: representation, estimation, and testing. *Econometrica: journal of the Econometric Society*, 251-276.
- European Commission, Joint Research Centre (JRC), International Energy Agency (IEA). (2022). EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research) Community GHG Database: IEA-EDGAR CO2, EDGAR CH4, EDGAR N2O, EDGAR F-GASES, version 7.0 [Datasets].
- Figueroa B, E., Pastén C, R. (2009). Country specific environmental Kuznets curves: A random coefficient approach applied to high-income countries. *Estudios de Economía*, 36(1), 5-32.
- Frodyma, K., Papież, M., Śmiech, S. (2022). Revisiting the environmental Kuznets curve in the European Union countries. *Energy*, 241, 122899.
- Graff Zivin, J., Neidell, M. (2013). Environment, health, and human capital. *Journal of Economic Literature*, 51(3), 689-730.
- Grossman, G. M., Krueger, A. B. (1991). Environmental impacts of a North American free trade agreement (No. w3914). National Bureau of Economic Research. Recuperado de <https://www.nber.org/papers/w3914>
- Kaika, D., Zervas, E. (2013). The Environmental Kuznets Curve (EKC) theory—Part A: Concept, causes and the CO2 emissions case. *Energy policy*, 62, 1392-1402.

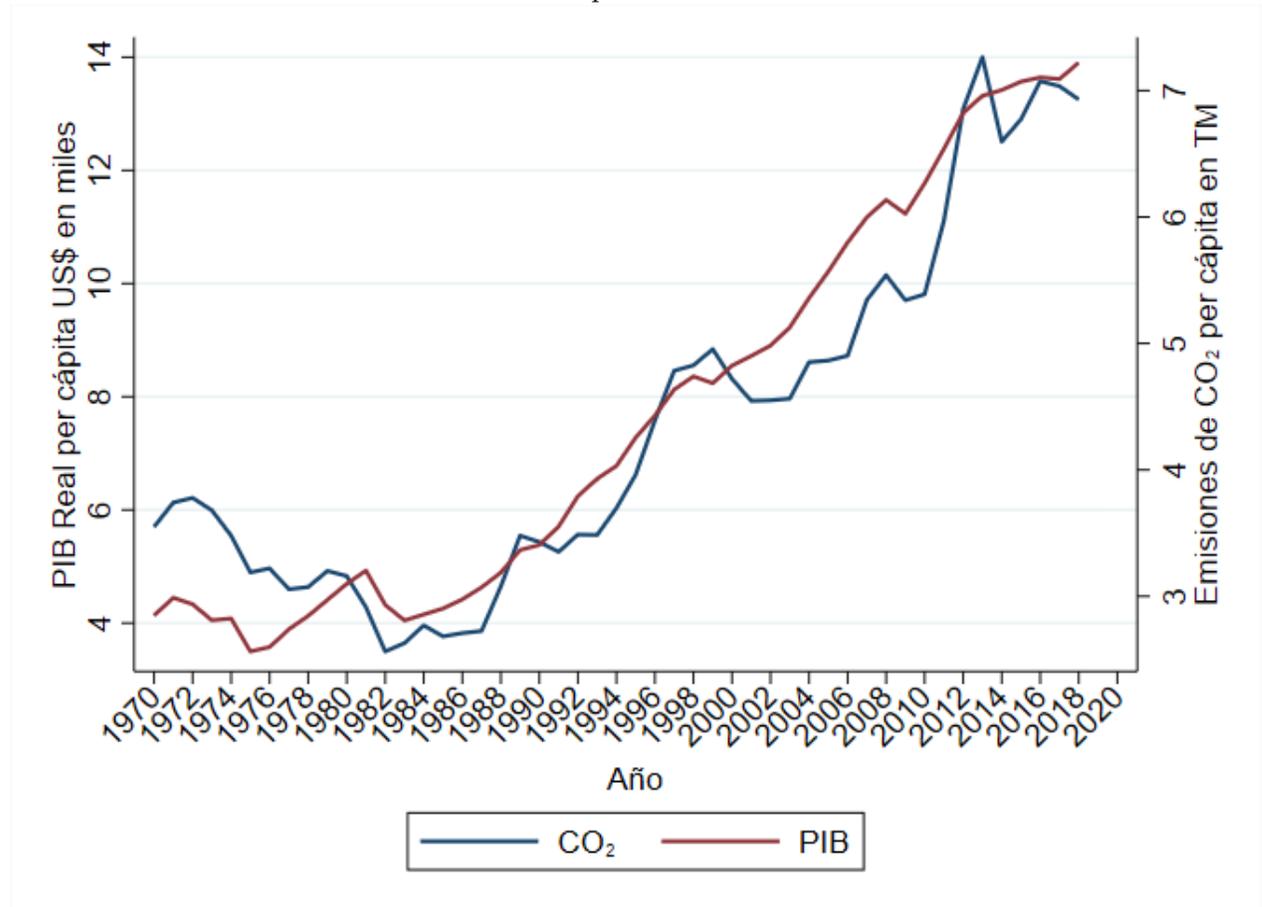
- Kirikkaleli, D., Güngör, H., Adebayo, T. S. (2022). Consumption-based carbon emissions, renewable energy consumption, financial development and economic growth in Chile. *Business Strategy and the Environment*, 31(3), 1123-1137.
- Marques, A. C., Fuinhas, J. A., Leal, P. A. (2018). The impact of economic growth on CO2 emissions in Australia: the environmental Kuznets curve and the decoupling index. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(27), 27283-27296.
- Ministerio de Medio Ambiente (2021). Informe del Estado del Medio Ambiente. <https://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/04/14-calidad-del-aire.pdf>
- Narayan, P. K. (2005). The saving and investment nexus for China: evidence from cointegration tests. *Applied economics*, 37(17), 1979-1990.
- Narayan, P. K., Narayan, S. (2010). Carbon dioxide emissions and economic growth: Panel data evidence from developing countries. *Energy policy*, 38(1), 661-666.
- Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). (2002). Indicators to measure decoupling of environmental pressure from economic growth.
- Organización Mundial de la Salud. (2018, October 29). Más del 90% de los niños del mundo respiran aire tóxico a diario. *Who.int*; World Health Organization: WHO. <https://www.who.int/es/news-room/detail/29-10-2018-more-than-90-of-the-world%E2%80%99s-children-breathe-toxic-air-every-day>
- Pablo-Romero, M. D. P., De Jesús, J. (2016). Economic growth and energy consumption: The energy-environmental Kuznets curve for Latin America and the Caribbean. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1343-1350.
- Pesaran MH, Shin Y. (1999). An autoregressive distributed lag modelling approach to cointegration analysis. Chapter 11 in *Econometrics and Economic Theory in the 20th Century: The Ragnar Frisch Centennial*
- 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.
- Saravia, A. (2005). Evidencias de la relación medio ambiente-economía en el caso latinoamericano. Estay, Jaime (ed.): *La Economía Mundial y América Latina: Tendencias, Problemas y Desafíos*, 259-280.
- Stern, D. I. (2004). The rise and fall of the environmental Kuznets curve. *World development*, 32(8), 1419-1439.

- Stern, D. I. (2017). The environmental Kuznets curve after 25 years. *Journal of Bioeconomics*, 19, 7-28.
- Stern, D. I., van Dijk, J. (2017). Economic growth and global particulate pollution concentrations. *Climatic Change*, 142, 391-406.
- Tiwari, A.K. Shahbaz, M. Hye. Q.M.A. (2013). The environmental Kuznets curve and the role of coal consumption in India: Cointegration and causality analysis in an open economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volumen 18, 519-527. -, Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032112005734>.
- Udemba, E. N., Tosun, M. (2022). Energy transition and diversification: A pathway to achieve sustainable development goals (SDGs) in Brazil. *Energy*, 239, 122199.
- UN Environment (Ed.). (2019). *Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy Planet, Healthy People*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108627146>
- Universidad de Chile. (2021). Especialistas U. de Chile alertan sobre los peligros de la contaminación atmosférica en la salud. *Uchile.cl*. <https://www.uchile.cl/noticias/176877/especialistas-uch-alertan-los-peligros-de-la-contaminacion-atmosferica>

9 Anexos

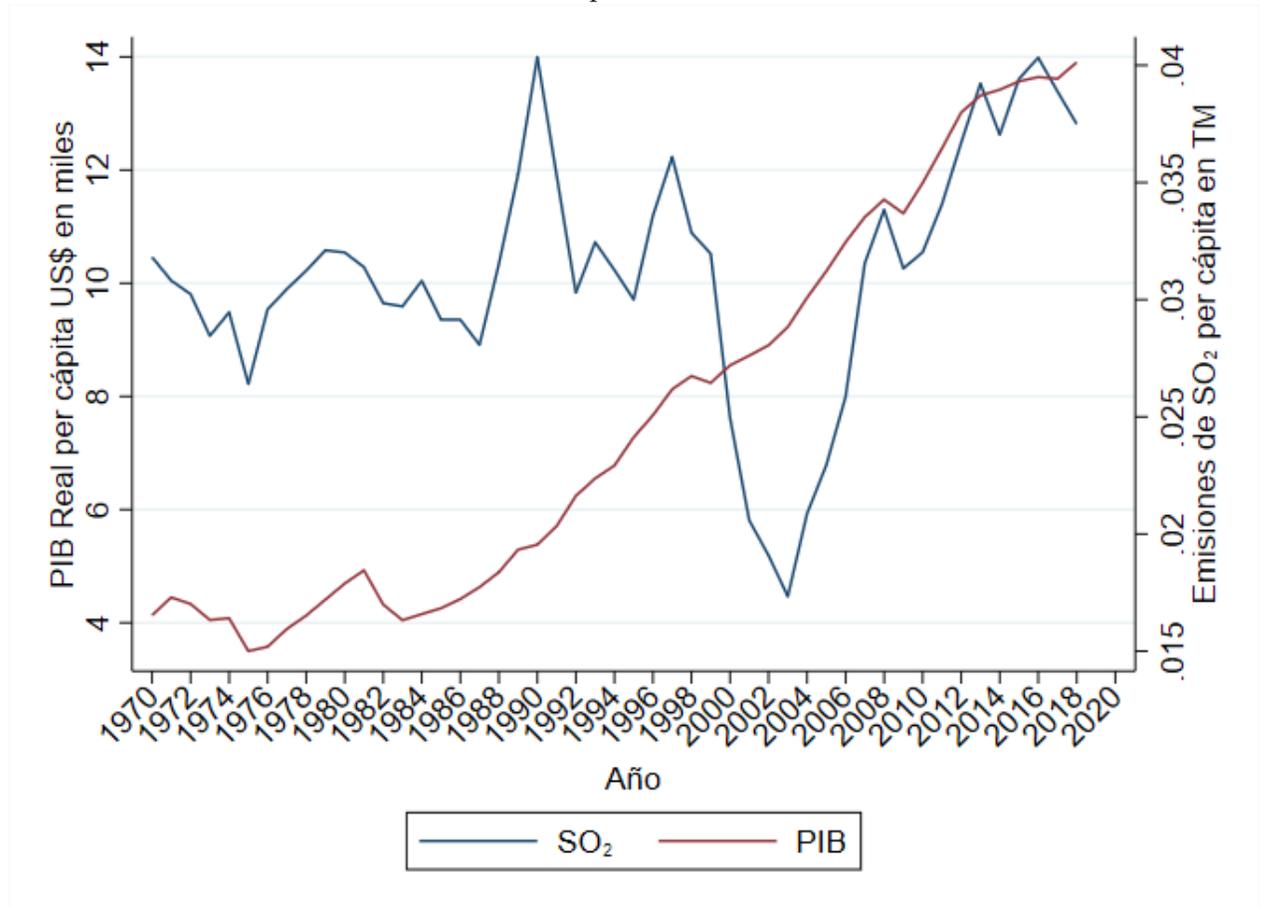
9.1 Gráficos comportamiento PIB y contaminantes

Anexo 1: Contaminación por CO_2 per cápita y el PIB real per cápita a lo largo del tiempo



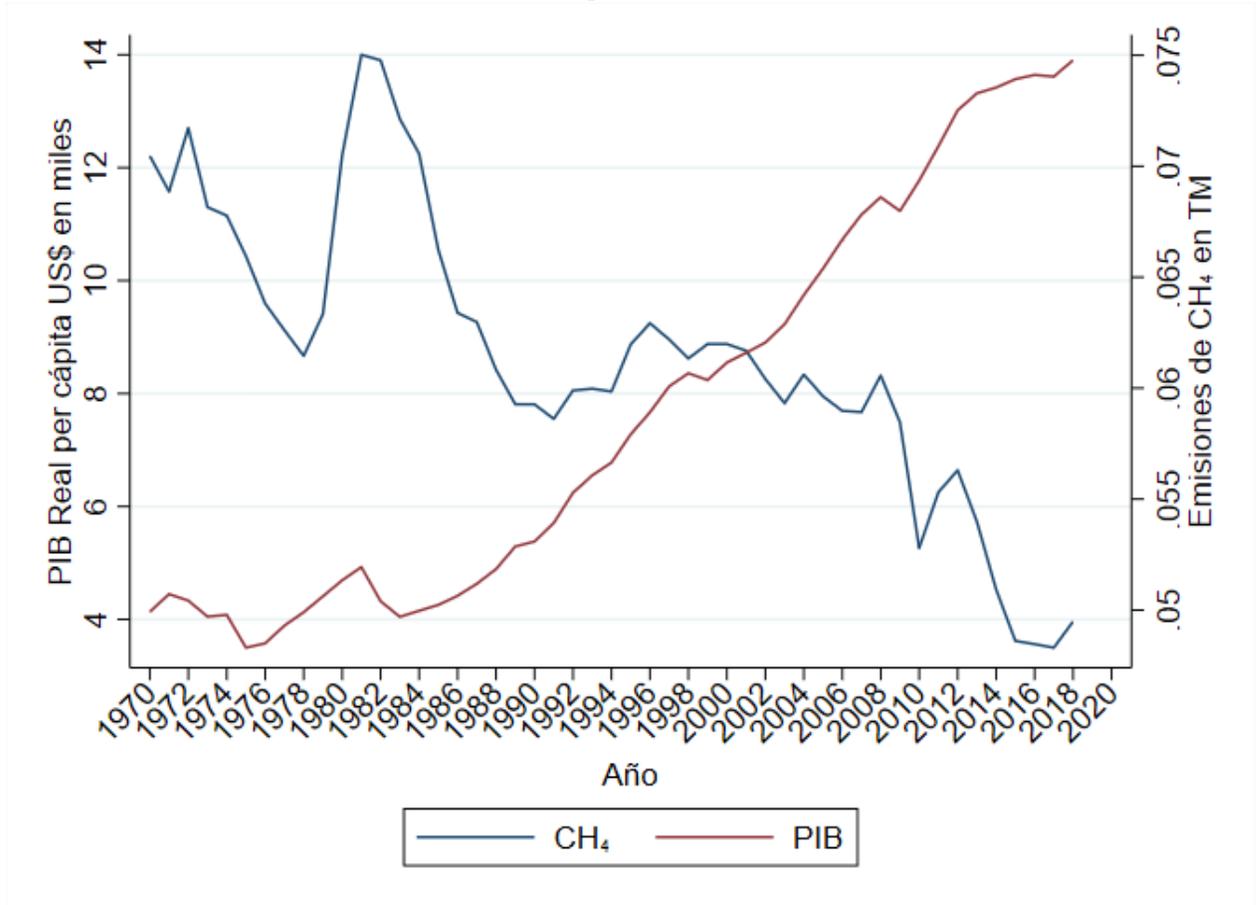
Fuente: Elaboración propia en base a datos de la EDGAR (European Commission, Joint Research Centre (JRC), International Energy Agency (IEA), 2022).

Anexo 2: Contaminación por SO_2 per cápita y el PIB real per cápita a lo largo del tiempo



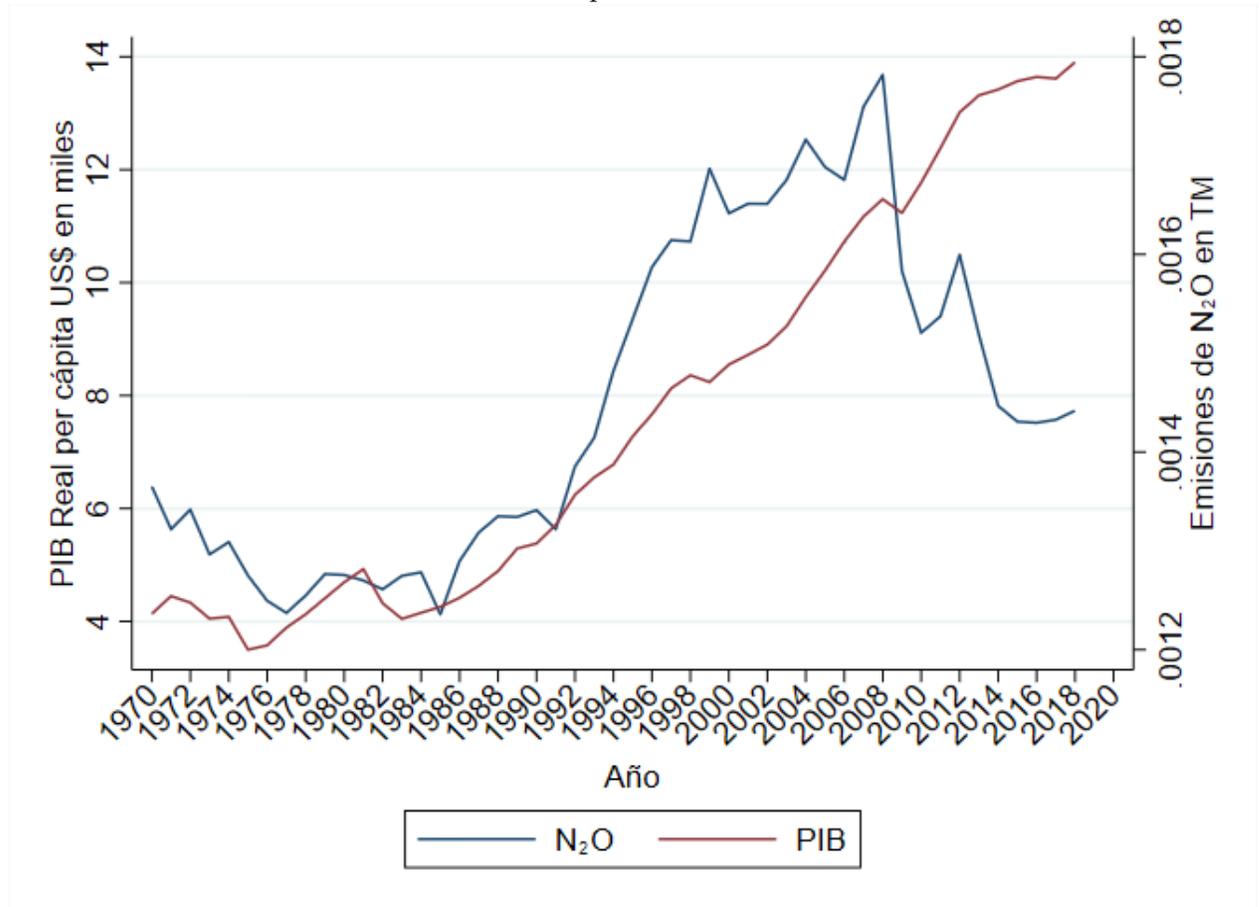
Fuente: Elaboración propia en base a datos de la EDGAR (European Commission, Joint Research Centre (JRC), International Energy Agency (IEA), 2022).

Anexo 3: Contaminación por CH_4 per cápita y el PIB real per cápita a lo largo del tiempo



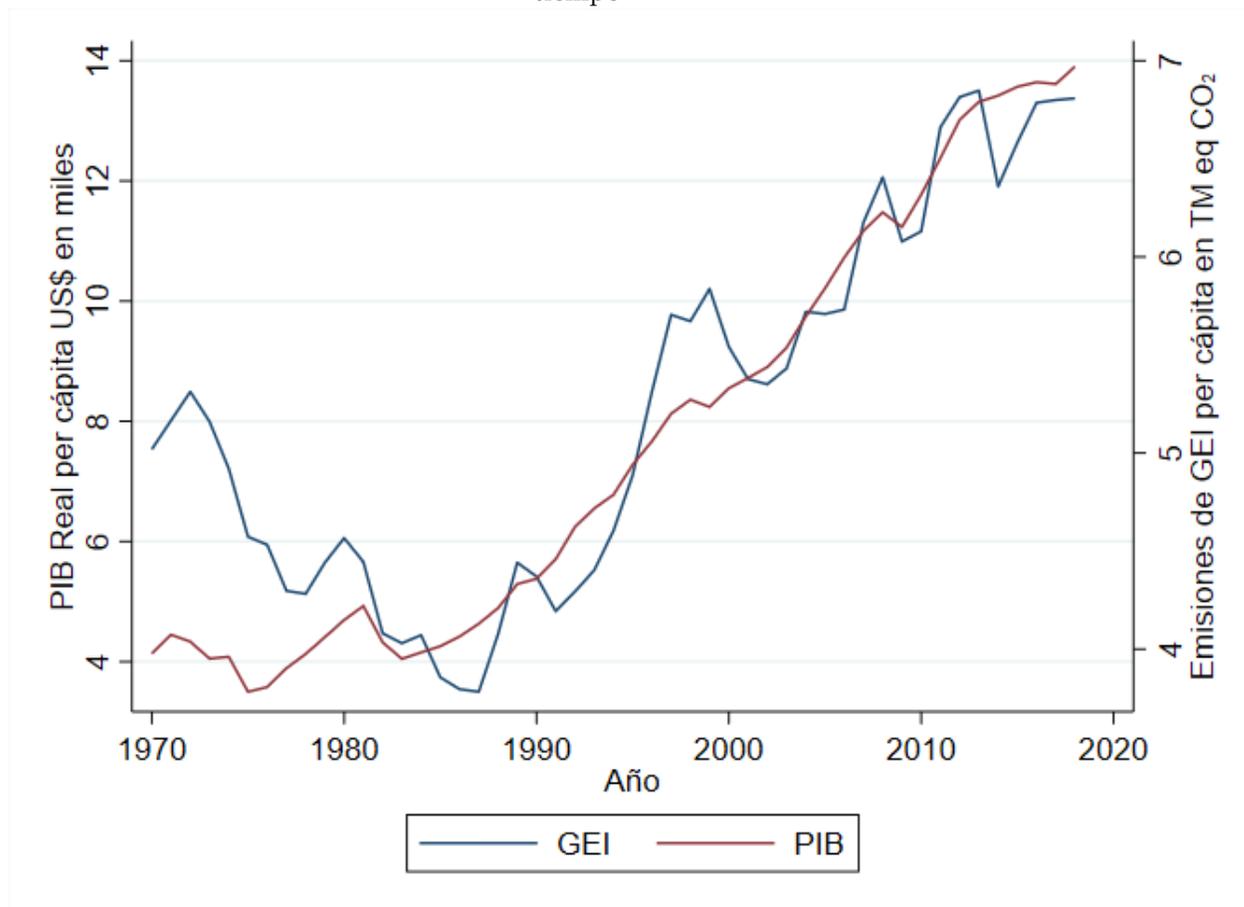
Fuente: Elaboración propia en base a datos de la EDGAR (European Commission, Joint Research Centre (JRC), International Energy Agency (IEA), 2022).

Anexo 4: Contaminación por N_2O per cápita y el PIB real per cápita a lo largo del tiempo



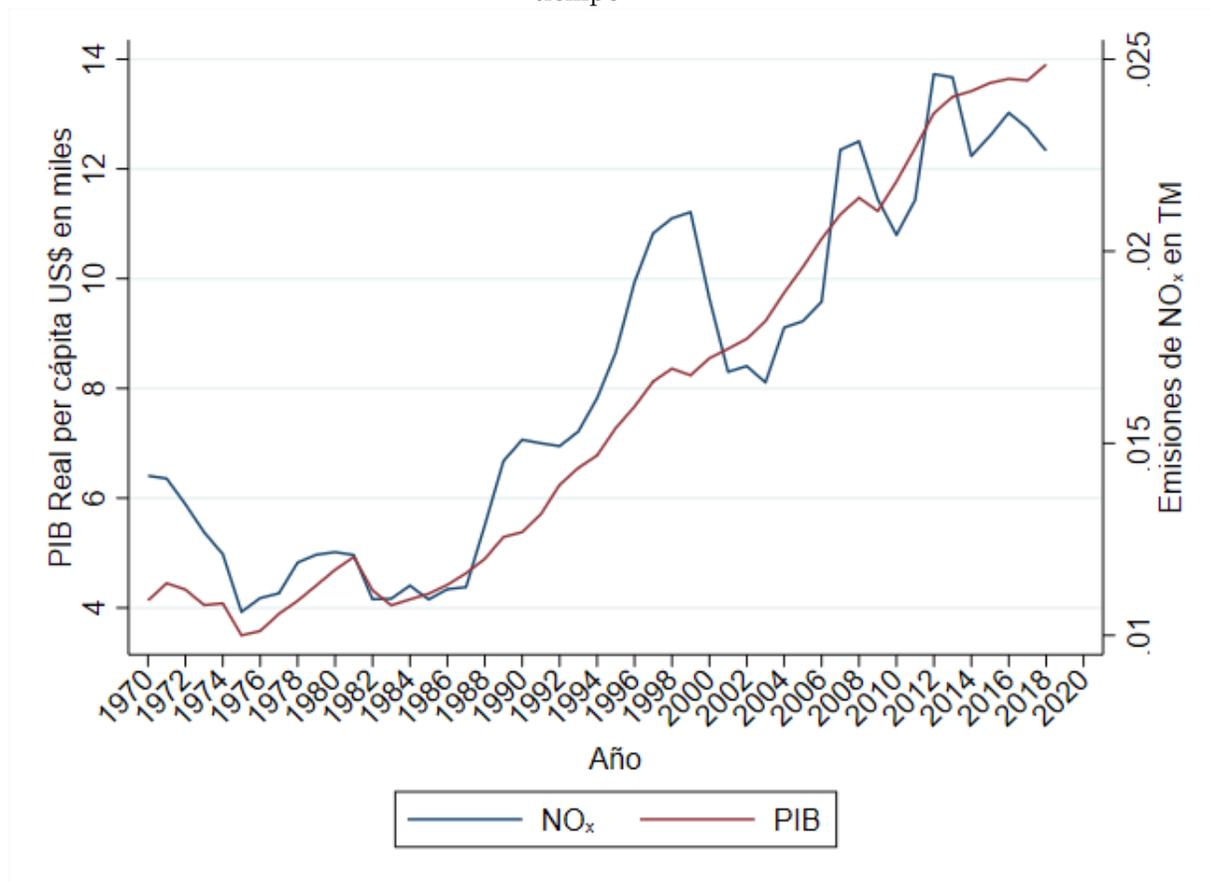
Fuente: Elaboración propia en base a datos de la EDGAR (European Commission, Joint Research Centre (JRC), International Energy Agency (IEA), 2022).

Anexo 5: Contaminación por GEI per cápita y el PIB real per cápita a lo largo del tiempo



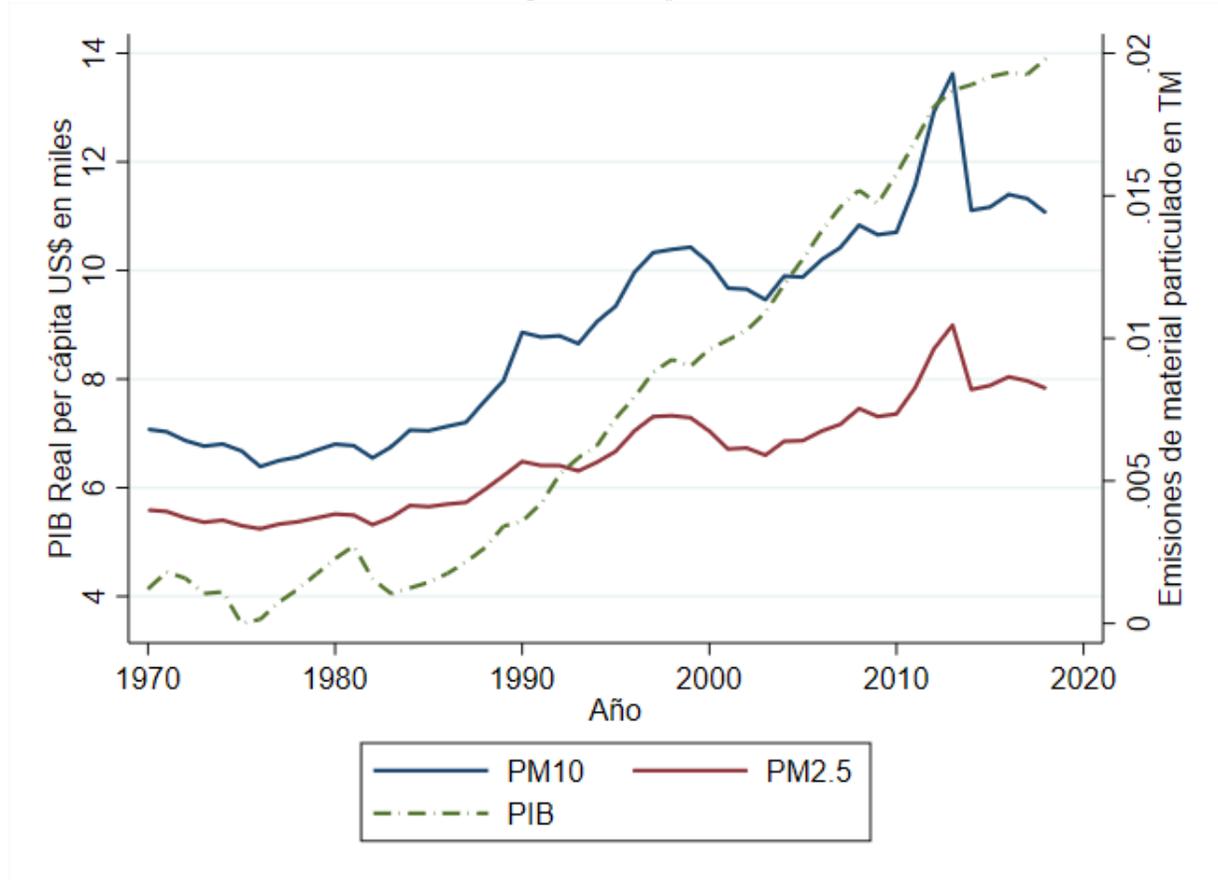
Fuente: Elaboración propia en base a datos de la EDGAR (European Commission, Joint Research Centre (JRC), International Energy Agency (IEA), 2022).

Anexo 6: Contaminación por NO_x per cápita y el PIB real per cápita a lo largo del tiempo



Fuente: Elaboración propia en base a datos de la EDGAR (European Commission, Joint Research Centre (JRC), International Energy Agency (IEA), 2022).

Anexo 7: Contaminación por material paarticulado per cápita y el PIB real per cápita a lo largo del tiempo



Fuente: Elaboración propia en base a datos de la EDGAR (European Commission, Joint Research Centre (JRC), International Energy Agency (IEA), 2022).

9.2 Resultados Prueba Dickey Fuller

Anexo 8: Resultados Prueba Dickey-Fuller

	Estadístico DF	P-value	1%	5%	10%	N
$Ln(PIB)$	-2.45	0.35	-4.17	-3.51	-3.18	48.00
$Ln(CO_2)$	-2.04	0.58	-4.17	-3.51	-3.18	48.00
$Ln(PIB)^2$	-2.48	0.34	-4.17	-3.51	-3.18	48.00
$Ln(SO_2)$	-1.69	0.75	-4.17	-3.51	-3.18	48.00
$Ln(CH_4)$	-1.94	0.63	-4.17	-3.51	-3.18	48.00
$Ln(NO_x)$	-2.72	0.23	-4.17	-3.51	-3.18	48.00
$Ln(PM25)$	-2.68	0.24	-4.17	-3.51	-3.18	48.00
$Ln(PM10)$	-2.19	0.50	-4.17	-3.51	-3.18	48.00
$Ln(N_2O)$	-0.98	0.95	-4.17	-3.51	-3.18	48.00
$Ln(GEI)$	-2.05	0.58	-4.17	-3.51	-3.18	48.00
$\Delta Ln(PIB)$	-5.06	0.00	-4.18	-3.51	-3.19	47.00
$\Delta Ln(CO_2)$	-4.85	0.00	-4.18	-3.51	-3.19	47.00
$\Delta Ln(PIB)^2$	-5.05	0.00	-4.18	-3.51	-3.19	47.00
$\Delta Ln(SO_2)$	-4.85	0.00	-4.18	-3.51	-3.19	47.00
$\Delta Ln(CH_4)$	-5.32	0.00	-4.18	-3.51	-3.19	47.00
$\Delta Ln(NO_x)$	-5.76	0.00	-4.18	-3.51	-3.19	47.00
$\Delta Ln(PM25)$	-5.48	0.00	-4.18	-3.51	-3.19	47.00
$\Delta Ln(PM10)$	-5.62	0.00	-4.18	-3.51	-3.19	47.00
$\Delta Ln(N_2O)$	-6.13	0.00	-4.18	-3.51	-3.19	47.00
$\Delta Ln(GEI)$	-4.86	0.00	-4.18	-3.51	-3.19	47.00

Nota: La hipótesis nula del test es que la variable no es estacionaria.

Fuente: Elaboración propia en base a datos de la EDGAR (European Commission, Joint Research Centre (JRC), International Energy Agency (IEA), 2022).