

# Modelo dinámico de emisiones de $CO_2$ : Perú (1905-2016)

Siwar Álvaro Ortiz Guzmán

27 de agosto, 2020

## Resumen

Este trabajo procura encontrar una función estructural que relacione un indicador de degradación ambiental y otro de desarrollo: emisiones de  $CO_2$  per cápita y PIB per cápita. Estudios recientes han refutado la hipótesis de que la curva U-invertida de Kuznets (Curva de Kuznets Ambiental, CKA) describe de forma robusta la relación entre emisiones de  $CO_2$  per cápita y PIB per cápita. Así, este trabajo investiga la hipótesis de la CKA utilizando modelos mixtos aditivos (MMA). Los hallazgos se complementan con el cálculo de la elasticidad entre emisiones de  $CO_2$  per cápita y PIB per cápita, así como la derivación de un estado estacionario para las emisiones.

## Abstract

This work aims to find the structural function that relates an indicator of environmental degradation and another of development:  $CO_2$  emissions per capita and GDP per capita. Recent studies have refuted the hypothesis that the Kuznets U-inverted curve (Environmental Kuznets Curve, EKC) robustly describes the relationship between  $CO_2$  emissions per capita and GDP per capita. Thus, this work investigates the EKC hypothesis using generalized additive mixed models (GAMS). The findings are complemented by calculating the elasticity between  $CO_2$  emissions per capita and GDP per capita, as well as the derivation of a steady state for emissions.

# 1. Introducción

Estudios científicos señalan, de forma cada vez más fehaciente, que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) producto de actividades antrópicas, como la actividad económica, son una de las causas directas del incremento de la temperatura promedio de la biosfera y el nivel del mar (e.g., Davis, Caldeira, y Matthews, 2010; Lacis, Schmidt, Rind, y Ruedy, 2010; Magnus, Melenberg, y Muris, 2011). Se ha establecido también que el cambio de la temperatura global debido a las emisiones de GEI, principalmente CO<sub>2</sub>, es irreversible en escalas de tiempo humanas (e.g., Eby y cols., 2009; Frölicher y Joos, 2010) y Gillett, Arora, Zickfeld, Marshall, y Merryfield (2011) han predicho que cambios de temperatura y precipitación continuarán empeorando siglos después de una reducción completa de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Estos resultados fundamentan la necesidad del presente estudio de aspirar a encontrar una función estructural dinámica (modelo dinámico) que relacione las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita con el PIB per cápita para Perú. Encontrar esta función nos permitirá también calcular la elasticidad entre las variables mencionadas, así como la derivación de un estado estacionario para las emisiones.

Históricamente los estudios que trataron la relación entre emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita y PIB per cápita asumieron la estructura de curva-U invertida de Kuznets (Curva Ambiental de Kuznets). Sin embargo, estudios recientes han refutado la hipótesis de que la curva U-invertida de Kuznets (Curva de Kuznets Ambiental, CKA) describe de forma robusta la relación entre emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita y PIB per cápita, pues habría un sesgo de pre-selección de modelo. Así, este trabajo investiga la hipótesis de la CKA utilizando modelos mixtos aditivos (MMA).

Esta investigación evalúa el proceso dinámico conjunto de las variables propuestas anteriormente recurriendo a la teoría sobre crecimiento económico y degradación del ambiente intergeneracional (véase Byrne, 1997; John y Pecchenino, 1994; John, Pecchenino, Schimmelpfennig, y Schreft, 1995; McConnell, 1997; Selden y Song, 1995; Stokey, 1998) y la crítica sobre el determinismo del ingreso per cápita para la convergencia de la degradación ambiental hecha por Arrow y cols. (1996).

Iniciamos presentando el planteamiento del problema para luego proceder con los alcances. Una justificación extensa se provee a continuación, seguida de los antecedentes que motivan la investigación. Posteriormente se describen detalladamente los objetivos y las hipótesis consecuentes. Luego el marco teórico es desarrollado minuciosamente para introducir la metodología y deducir los resultados esperados. Finalmente, se discuten los hallazgos y se concluye con recomendaciones.

## 2. Planteamiento del problema

En la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 2015, los países participantes firmaron el Acuerdo de París, denominado así por la ciudad en que se realizó la conferencia. El acuerdo tiene por objeto evitar las posibles consecuencias adversas (colapso de ecosistemas, desaparición de especies, etc.) que tendría un aumento de la temperatura promedio global. Dos acuerdos resaltan: limitar el aumento de la temperatura promedio global a 1.5 °C y llegar al máximo nivel de emisiones de GEI cuanto antes con excepción de los países en vías de desarrollo. Este último acuerdo devela que los funcionarios públicos y los funcionarios de los organismos internacionales consideran que la evolución dinámica de las emisiones de GEI presenta una forma de U invertida y la variable que ocasionaría la perturbación de las emisiones es el crecimiento económico.

Esta concepción sobre la evolución de las emisiones de GEI respecto al crecimiento económico en forma de U invertida se fundamenta en la hipótesis que planteó Kuznets (1955) sobre la relación entre la desigualdad de ingresos y el crecimiento económico. La traducción en términos ambientales de la hipótesis de Kuznets se denominó Curva de Kuznets Ambiental: en el estadio inicial de crecimiento de un país la degradación ambiental se incrementa de forma más que proporcional, pero pasado un punto de ingreso per cápita la degradación empieza a disminuir.

Teniendo esto último en cuenta y considerando que los países han acordado proporcionar una moratoria a los países en vías de desarrollo para que reduzcan sus emisiones, habría que preguntarse ¿qué nivel de ingreso per cápita tendrían que alcanzar estos países para que empiecen a disminuir sus emisiones? Es evidente que esta respuesta no puede ser igual para todos los países en vías de desarrollo pues entre ellos existen diferencias estructurales y este trabajo no evaluará estas diferencias. Así, reformulamos la pregunta para el caso de Perú y añadimos ¿cuánto tiempo tardaría el Perú en alcanzar dicho nivel de ingreso per cápita para empezar a disminuir sus emisiones de GEI? No obstante, surge otra interrogante que cambiaría el objeto de análisis ¿qué sucede si la relación entre ingreso per cápita y emisiones de GEI no presenta una forma de U invertida? Esta situación implicaría que el crecimiento no se vuelve más “limpio” a medida que se incrementa. Es decir, si la relación entre el crecimiento y la degradación ambiental es constante y directa no existiría un nivel de ingreso per cápita tras el cual la tasa de contaminación disminuya.

Hay que tener en cuenta que los patrones de demanda y oferta son los que determinan la composición del sistema productivo de una economía y por consiguiente se determina, también, si la producción que se obtiene es relativamente intensiva en emisiones de GEI, medida por emisiones por producto (Emisiones/Producto). Asimismo, la evolución de estos patrones de demanda y oferta, a medida que crece una economía, determinan el cambio de la intensidad de emisiones del sistema productivo y las emisiones globales del

país en cuestión. Estas observaciones nos inducen a considerar que un estudio que intente determinar la función que relaciona el crecimiento con la degradación ambiental tiene que evaluar el desarrollo de la composición de la demanda y oferta a largo plazo. Sin embargo, tratar de proyectar la composición de la demanda y oferta es una tarea difícil. Por esta razón se ha estudiado la relación entre crecimiento y emisiones con los indicadores de ingreso per cápita y emisiones de CO<sub>2</sub>, como el GEI más representativo de los que se emiten.

Con relación a esto último, se presenta un problema a los funcionarios públicos de las instituciones ambientales del país, principalmente al Ministerio del Ambiente como ente rector en materia ambiental, y a los hacedores de política en general, como el Centro Nacional de Planeamiento Estratégico, que es el desconocimiento de una función estructural dinámica (modelo dinámico) que relacione las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita con el PIB per cápita para Perú. Sin un modelo medianamente bien aproximado sobre la evolución a largo plazo de la degradación ambiental para el Perú no se pueden establecer políticas para el control de las emisiones agregadas del país ni el cumplimiento del acuerdo de París, considerando además que los países cercanos a la línea ecuatorial, como el Perú, serán los más afectados.

Para estimar un modelo de degradación ambiental para Perú se puede optar por dos opciones. Una aproximación más completa por parte de los reguladores y los hacedores de política en materia ambiental para evaluar la correlación entre producción y degradación ambiental sería que se adopte la perspectiva de metabolismo social que aporta la Economía Ecológica Alier y Jusmet (2015). Esto implica estudiar tanto la entrada y salida de los flujos de materiales y energí que requiere el sistema productivo para proveer de materialidad al país. De esta forma se podría construir una matriz de coeficientes técnicos que permitiría a los reguladores y hacedores de política saber qué sectores finales e intermedios contaminan más para producir una unidad de producto. Esto permitiría optar por políticas y regulaciones más focalizadas que estén orientadas a acelerar la adopción de tecnologías más limpias de producción en los sectores que son más intensivos en emisiones de CO<sub>2</sub>.

Como recopilar semejante cantidad de datos sobre emisiones para los 54 sectores productivos que considera el INEI es muy difícil. Además, en el caso hipotético que se pretendiera recolectar la data mediante encuestas de una muestra representativa de empresas habría incentivos para sub-reportar emisiones y así evitar que se regule el sector al que pertenece cada empresa. Por estas razones, no hay otra opción más que estimar la función que relaciona las emisiones de CO<sub>2</sub> con el PIB per cápita con los datos de “salida” (output) del metabolismo social. Esta es una medición de la entropía que produce la economía. Sin embargo, otra opción que tendrían los reguladores y hacedores de política para evaluar la degradación es estudiar el uso de materiales del sistema productivo.

Describiremos esta aproximación más adelante de forma superflua pues este trabajo no analizará esta opción.

Además de los problemas que presentan el método (medir la degradación en la entrada y salida de materiales, o solo en la salida) y la obtención de los datos (sub-reporte, inexistencia de datos, etc.), se presenta el problema de elegir la especificación del modelo. Esto significa que elegir una forma cuadrática de U invertida representa un sesgo de selección de modelo. Lo más adecuado sería probar con distintas formas funcionales o, si se dispone de los recursos computacionales, dejar que los datos develen la relación que guardan entre sí a través de las nuevas técnicas de Machine Learning.

Por todo lo anteriormente expuesto, queda claro que ante la incertidumbre sobre los posibles efectos adversos que se podrían suscitar por un aumento sostenido de la temperatura promedio global producto de las emisiones de GEI los entes reguladores en materia ambiental de los países en vías de desarrollo, como el Perú, deberían tener algún modelo o una serie de modelos que proyecten medianamente bien la evolución de las emisiones a largo plazo y cómo estas interactúan con el crecimiento de la economía.

Finalmente, en el Perú solo se han realizado dos estudios sobre la CKA: uno que, en vez de usar las emisiones de CO<sub>2</sub> como indicador de degradación, utiliza la la entrada de materiales al metabolismo social para el consumo doméstico y otro que sí estima una CKA en forma de U invertida. Se comentará el primero de ellos más adelante de forma breve.

### 3. Alcances

Este trabajo estima una relación funcional dinámica entre las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita, como indicador de degradación ambiental, y PIB per cápita como indicador de crecimiento económico para todo el país de Perú. Es decir, se trabajará con datos agregados de emisiones de CO<sub>2</sub> y PIB per cápita agregados. La razón de esta orientación es la inexistente o escasa data que existe para los 25 departamentos particulares del país. En el caso de la escasa data existente se tienen registros para los departamentos pero en intervalos de tiempo muy cortos que no permitirían hacer un análisis dinámico y predictivo robusto. Aun que, lo que sí se podría hacer con esta data sería un análisis de datos panel para todos los departamentos que permitiría relacionar la estructura productiva de cada departamento con las emisiones que produce. Hay departamentos que emiten más que otros por el tipo de actividades que se desarrollan en los mismos. No obstante, un limitante de este trabajo es que no considerará estas diferencias departamentales.

Otro limitante ligado al trabajo con datos agregados es que no se puede diferenciar entre sectores que son relativamente intensivos en emisiones por unidad de producto y los que no lo son. Tampoco se puede observar, en este trabajo, las diferencias en emisiones de

los sectores intermedios y finales. Se ha mencionado que este estudio utilizará los datos de salida del metabolismo social Alier y Jusmet (2015).

Como se mencionó, una de las razones por las que se eligió realizar el análisis con datos agregados es por la disponibilidad de estos. Por un lado, en el caso del PIB per cápita se trabaja con la base de datos del proyecto Maddison que tiene registros desde 1600 hasta el 2018. Por otro lado, en el caso de las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita se trabaja con la base de datos del Global Carbon Project que cuenta con registros desde 1905 hasta 2016 para Perú. Juntando estas dos bases de datos obtuvimos la base con la cual realizaremos las estimaciones que va e desde 1905 hasta 2016, un total de 112 observaciones.

Respecto al alcance temático, la investigación se basará dos vertientes de la economía. Por un lado, en la teoría sobre crecimiento económico y degradación del ambiente intergeneracional (véase Byrne, 1997; John y Pecchenino, 1994; John y cols., 1995; McConnell, 1997; Selden y Song, 1995; Stokey, 1998) y la crítica sobre el determinismo del ingreso per cápita para la convergencia de la degradación ambiental hecha por Arrow y cols. (1996). Por otro lado, en la vertiente de análisis de entradas y salidas de flujos de energía que proporciona la economía ecológica (Alcott, Giampietro, Mayumi, y Polimeni, 2012; Alier y Jusmet, 2015). Esto implica que estudiaremos la insustentabilidad del crecimiento peruano a largo plazo si las emisiones de CO<sub>2</sub> aumentan pari pasu con la producción.

No se pretende, sin embargo, encontrar un nivel de emisiones per cápita óptimo, pues se tendrían que considerar dos aspectos: (1) las emisiones de GEI son males públicos globales, lo cual implica que las emisiones de un país afectan a todos los demás, aunque en grados distintos, y (2) se tendría que calcular la capacidad de carga y de resiliencia de los ecosistemas peruanos, principalmente amazónicos, ante aumentos sostenidos de CO<sub>2</sub> en el tiempo hasta que el Perú alcanzase un nivel de PIB per cápita de inflexión.

Estas últimas consideraciones son parte de un estudio más amplio que no se realizará en la presente investigación. Como se mencionó, esta investigación pretende incitar a que se realicen más estudios sobre las emisiones de GEI estableciendo una primera aproximación a la forma estructural dinámica que relaciona las emisiones con el PIB. También, se intentará esbozar las posibles consecuencias que tendría el aumento sostenido del producto sobre las emisiones.

El alcance normativo se ceñirá a la Ley N<sup>o</sup> 28611, Ley General del Ambiente. Esto se debe a que el enfoque de este estudio será eco-sistémico y no solo específicamente sobre el aire. Así, para efecto del estudio, es de particular relevancia el artículo 93<sup>o</sup>, Título III, Capítulo I, Del enfoque eco-sistémico.

En suma, el estudio se enfocará en estimar una relación funcional dinámica entre las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita, como indicador de degradación ambiental, y PIB per cápita como indicador de crecimiento económico para todo el país de Perú. El lapso temporal

en el que se centrará la investigación comprende desde 1905 hasta 2017. Respecto al alcance temático, la investigación se basará en la hipótesis de U invertida de Kuznets y en la vertiente de análisis de entradas y salidas de flujos de energía que proporciona la economía ecológica y el alcance normativo se ceñirá al enfoque eco-sistémico de la Ley N° 28611.

## 4. Justificación

La formulación de políticas o regulaciones dirigidas a mantener un ambiente apto, para el pleno desarrollo de la vida de los integrantes de una sociedad, no se puede concretar si no se conocen el estado actual de degradación y la “velocidad” actual de contaminación. En este sentido, la cuantificación de la magnitud de emisiones, desechos, efluentes, etc., como indicadores de degradación, y la estimación de una función que explique cómo estos fenómenos varían respecto a shocks antrópicos, como el crecimiento económico, son pasos iniciales necesarios para que las regulaciones y los funcionarios de instituciones ambientales comprendan la dimensión del problema que enfrentan.

Por las razones anteriores y debido al hecho de que solo existen dos investigaciones a nivel nacional sobre la correlación entre degradación y crecimiento, este estudio cuantifica esta relación desde nuevas perspectivas de la literatura más reciente. Este último aspecto es una de las motivaciones principales, pues históricamente los estudios que han desarrollado este tópico han partido de la hipótesis de U invertida de Kuznets que representa un sesgo de pre-selección de modelo. Así, este trabajo pretende aplicar las nuevas especificaciones polinómicas que se han probado en países europeos e incluso nuevos métodos de estimación si es necesario para obtener la mejor aproximación a la relación que la degradación y el crecimiento guardan entre sí.

Iniciamos esta sección mencionando la necesidad de poseer alguna medida de la magnitud y la tasa de cambio de algún fenómeno que se desee “controlar”. Respecto a esto, generar conocimiento para las instituciones encargadas de salvaguardar la seguridad ambiental es otra de las motivaciones de esta investigación. Se considera que este conocimiento sobre degradación ambiental por emisiones puede servir para formular planes de acción a mediano y largo plazo que tengan por objeto mitigar y adaptar las actividades productivas en un escenario de efectos adversos significativos por el cambio climático en el Perú.

Por lo tanto, tres aspectos principales motivan esta investigación. En primer lugar, se pretende cuantificar la magnitud y la velocidad de cambio del problema para que las políticas ambientales y regulatorias tengan en cuenta la dimensión real del problema. En segundo lugar, investigaciones pasadas sobre la co-evolución entre emisiones y crecimiento han obtenido resultados que eran producto de los supuestos restrictivos de los modelos

estimados, por esta razón este estudio procurará utilizar nuevas especificaciones de la más reciente literatura. Por último, generar conocimiento para las instituciones encargadas de salvaguardar la seguridad ambiental es otra de las motivaciones de esta investigación.

## 5. Antecedentes

La literatura disponible que indaga sobre los vínculos entre degradación ambiental y crecimiento económico es bastante amplia: algunos autores apoyan la hipótesis de la CKA, otros la refutan y proponen nuevas formas de especificar la relación funcional entre ambos fenómenos. Lamentablemente en el Perú solo se han realizado dos estudios al respecto y están directamente relacionados a la comprobación de la CKA. Así, en esta sección se revisarán algunos autores y sus planteamientos sobre el problema que concierne a este estudio: estimación de una relación dinámica entre degradación ambiental y crecimiento. Primero se revisa uno de los estudios realizados para el contexto peruano para luego exponer los resultados de estudios realizados por académicos foráneos.

En el contexto peruano, Minaya Flórez (2018) estimó la relación funcional de degradación ambiental y crecimiento basándose en el concepto de metabolismo social de la economía ecológica. A diferencia de otros estudios y del que se pretende realizar en el presente trabajo, utilizó como indicador de degradación ambiental el consumo doméstico de materiales (CDM) del Perú para el periodo 1970-2015 (Minaya Flórez, 2018). Este indicador mide el total en toneladas de materiales que consume una economía y se calcula de la siguiente forma: Extracción Doméstica + Importaciones – Exportaciones. Minaya Flórez (2018) muestra que la estructura primario exportadora del Perú incide en la intensidad de degradación ambiental que genera la economía.

Los resultados obtenidos muestran que para la estimación con la variable de PIB en niveles habría una relación de U invertida entre el CDM y el PIB aunque el período de años analizados es muy corto, 1990-2015, por lo que el resultado no es concluyente Minaya Flórez (2018). Respecto al resultado de la estimación con PIB per cápita, Minaya concluye que no existe relación de U invertida pues los coeficientes no son significativos.

Entre las investigaciones foráneas que tratan el tema de la CKA se encontró uno que sirve como principal basamento de este estudio. Zanin y Marra (2012) estimaron distintas especificaciones de la CKA usando datos anuales desde 1960-2008 para distintos países: Australia, Austria, Canadá, Dinamarca, Finlandia, Francia, Italia, España y Suiza. Los modelos estimados se basaron en el tipo de Modelos Mixtos Aditivos (MMA). Dichos modelos son adecuados para manejar efectos covariables de manera flexible, utilizando splines penalizadas y simultáneamente lidiar con autocorrelación en residuos mediante el uso de un proceso de media móvil autorregresivo (Zanin y Marra, 2012). Para realizar el contraste de eficacia explicativa entre las especificaciones tradicionales y la nueva



propuesta, los autores primero estimaron modelos cuadráticos y cúbicos por Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) y luego por MMA.

Los resultados de Zanin y Marra (2012) muestran que las estimaciones por MCO presentan problemas de colinealidad entre los parámetros estimados de los polinomios. Asimismo, los test de diagnóstico para correlación entre los errores revelaron presencia de correlación serial residual. Por estas razones, los autores estimaron los modelos con MMA y obtuvieron coeficientes significativos, sin colinealidad, errores normalmente distribuidos, homocedásticos y sin correlación serial. Los hallazgos develan que solo en los casos de Francia y Suiza existe una relación de U invertida entre emisiones de CO<sub>2</sub> e ingreso per cápita (Zanin y Marra, 2012). El resto de países presenta relaciones constantemente crecientes, en forma de M, como es el caso de Canadá y Dinamarca, o en forma de L invertida (crecimiento inicial y luego un largo estado estacionario de emisiones) como Finlandia y Australia (Zanin y Marra, 2012).

Otro estudio realizado sobre la CKA relevante fue hecho por Diaz-Vazquez y cols. (2009), cuyo principal objetivo fue determinar la existencia de variables exógenas a la CKA que hayan tenido mayor influencia en contrarrestar la escala de degradación ambiental que el aumento del ingreso per cápita considerado en el modelo tradicional. Esto se basa en la crítica sobre el determinismo del ingreso per cápita para la convergencia de la degradación ambiental hecha por Arrow y cols. (1996). Diaz-Vazquez y cols. (2009), al igual que Zanin y Marra (2012), considera que la pre-especificación del modelo conlleva a un sesgo de selección y añade que se puede cometer un sesgo al omitir otras variables explicativas que no sean el ingreso per cápita. Además, a parte de estimar el modelo en logaritmos se estima en primeras diferencias.

El periodo analizado por Diaz-Vazquez y cols. (2009) comprende los años 1950-1999. Como indicadores de degradación ambiental no solo se utilizan las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita sino también las de azufre. Para estimar el modelo se utilizaron datos panel de 22 países de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE), 36 países no pertenecientes a la OCDE y para todos los países en conjunto (World).

Entre las principales conclusiones de Diaz-Vazquez y cols. (2009) se puede constatar que a pesar de que existen factores relacionados a la variación/crecimiento del ingreso per cápita, que influyen en la reducción de la escala de degradación ambiental, estos no son lo suficientemente fuertes para reducir el punto de quiebre (turning point), en el cual las emisiones se reducen, a niveles alcanzables de ingreso per cápita. Esto se deduce por los coeficientes estimados de los términos cuadráticos que son cercanos a cero, lo cual implica que se tendría que alcanzar niveles muy altos de PIB per cápita, ni siquiera alcanzados por los países de la OCDE, para que las emisiones empiecen a descender (Diaz-Vazquez y cols., 2009).

A modo de contraste, Stern y Common (2001) investigaron si la hipótesis de la CKA

también podría aplicarse al azufre, después de todo, como se mencionó en el planteamiento del problema, la relación de U invertida no solo aplica a las emisiones de CO<sub>2</sub> como indicador de degradación ambiental sino a cualquier indicador (emisiones de dióxido de azufre, lixiviación de azufre por la explotación de mineras, etc.). A diferencia de las emisiones de CO<sub>2</sub>, que no afecta directamente y totalmente al país emisor, la contaminación por emisiones o lixiviación de azufre sí suele afectar totalmente al país emisor y sus actividades económicas: la lluvia ácida empobrece la calidad del suelo destinado a cultivos, etc. (Stern y Common, 2001).

En su análisis Stern y Common (2001) utilizan datos panel para la mayoría de países del mundo en un período que abarca desde 1850 a 1990. Las fuentes de emisión de azufre que los autores consideraron para la obtención de agregados por país son: quema de antracita, quema de lignito, quema de petróleo y actividades de minería y fundición. Con estos datos y los de PIB en términos per cápita Stern y Common (2001) especificaron un modelo cuadrático logarítmico, CKA típico, para el mundo entero (WORLD), países de la OCDE y no pertenecientes a la OCDE. También estimaron modelos con efectos fijos y aleatorios que integraban efectos por país y tiempo.

Primero se estimó el modelo en niveles y luego en primeras diferencias. El resultado para el modelo en niveles. Para todo el conjunto de países (WORLD) la CKA tiene forma de U invertida para las formulaciones de efectos fijos y aleatorios. El punto de inflexión para las emisiones de azufre es muy alto 101,166 dólares de PIB per cápita (Stern y Common, 2001). Estos hallazgos corroboran, igual que los anteriores, que el crecimiento económico es insuficiente para reducir la degradación ambiental a largo plazo.

Por último, de todas las investigaciones revisadas en el proceso de elaboración de este estudio, el de Fodha y Zaghdoud (2010) enfocado en Túnez, una economía pequeña y abierta, puede establecer algún paralelo con la economía peruana. Aunque, es importante resaltar que el sector industrial representa el 25.7 % de la economía tuneza, lo cual representa una diferencia estructural respecto al sector industrial (15 %) en la economía peruana. Fodha y Zaghdoud (2010) sostienen que “pasar de un estudio de datos panel a uno de series de tiempo de países individuales es una nueva tendencia para los investigadores de la CKA, ya que este último puede eliminar los problemas asociados con los datos panel”.

Como se mencionó, Fodha y Zaghdoud (2010) utilizan datos de series de tiempo para Túnez. Igual que Diaz-Vazquez y cols. (2009) recurren a dos indicadores de degradación ambiental: emisiones de CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> (dióxido de azufre) en términos per cápita. Esto con el objetivo de tener en cuenta no solo un contaminante de efecto global (CO<sub>2</sub>) sino, también, de efecto local (SO<sub>2</sub>). Los datos de PIB per cápita están dólares constantes tomando en cuenta la paridad de poder adquisitivo (PPA). El período de análisis abarca desde 1961 – 2004. Se especificó un modelo cúbico logarítmico pues permite testear cuatro hipótesis

con relación a la forma funcional: N, N invertida, U y U invertida (Fodha y Zaghdoud, 2010).

Los resultados muestran que los modelos estimados para cada tipo de emisión son significativos al 1 % de confianza. En el caso del modelo estimado que relaciona las emisiones de CO<sub>2</sub> con el PIB per cápita, el coeficiente del término cúbico tiene signo positivo, por lo que indica una evolución a largo plazo entre degradación y crecimiento en forma de N (Fodha y Zaghdoud, 2010). Incluso, observan los autores, podría tratarse de una relación estrictamente creciente pues los punto de inflexión están muy próximos uno de otro. Para el caso del modelo estimado que relaciona las emisiones de SO<sub>2</sub> con el PIB per cápita, el coeficiente del término cúbico tiene signo negativo, por lo que indica una evolución a largo plazo en forma de N invertida entre vertimientos de azufre y crecimiento (Fodha y Zaghdoud, 2010).

## 6. Objetivos

### 6.1. Objetivo general

Estimar, con los nuevos métodos (penalized spline, MMA, etc.) y modelos que se han desarrollado en la más reciente literatura de economía ambiental (modelos cúbicos, etc.), una función dinámica (modelo dinámico) que relacione la evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> con el PIB per cápita para la economía peruana en un período de tiempo de 112 años, que abarca desde 1905 hasta 2016.

### 6.2. Objetivos específicos

- Calcular la elasticidad entre CO<sub>2</sub> per cápita y PIB per cápita y su evolución en el tiempo
- Comprobar la existencia de un estado estacionario de largo plazo para las emisiones, en caso exista una relación creciente entre emisiones y producción, o un punto de inflexión, en caso exista una relación de U invertida entre emisiones y producción

## 7. Hipótesis

### 7.1. Hipótesis general

La función estructural dinámica (modelo dinámico) que relaciona la evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> con el PIB per cápita para la economía peruana en un período de tiempo de 112 años, que abarca desde 1905 hasta 2016, devela una forma creciente en el tiempo, no de U invertida.

## 7.2. Hipótesis específicas

- La elasticidad entre CO<sub>2</sub> per cápita y PIB per cápita ha disminuido en el tiempo
- Existe una relación directa y creciente entre emisiones de CO<sub>2</sub> y PIB per cápita, tanto en el corto como en el largo plazo, por lo que no existiría un estado estacionario de emisiones en un horizonte extendido.

## 8. Marco teórico

En esta sección se presentan los conceptos y teorías en los que se basará el análisis de este estudio. Primero se revisa la teoría y los conceptos aportados por la Curva de Kuznets y particularmente la Curva de Kuznets Ambiental. Luego se examina la teoría sobre crecimiento económico y degradación del ambiente intergeneracional y la crítica sobre el determinismo del ingreso per cápita para la convergencia de la degradación ambiental hecha por Arrow y cols. (1996). Finalmente se repasa la vertiente de análisis de entradas y salidas de flujos de energía que proporciona la economía ecológica (e.g., Alcott y cols., 2012; Alier y Jusmet, 2015).

### 8.1. Curva de Kuznets

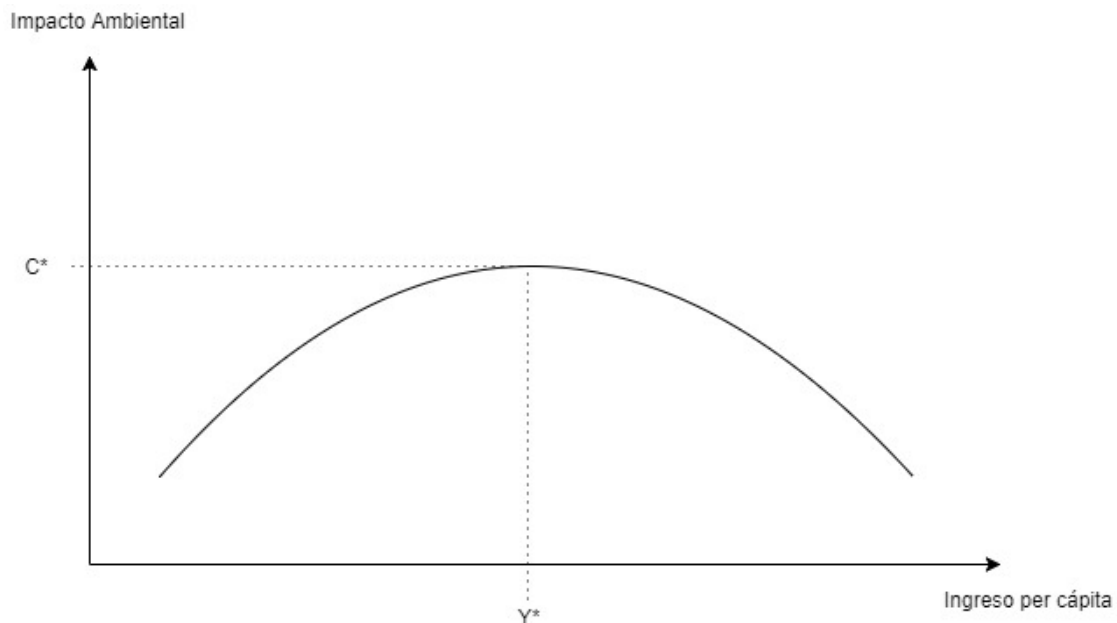
En 1955, el economista Simon Kuznets, en su artículo *Economic Growth and Income Inequality*, propuso la hipótesis de que existía una relación de U invertida en la evolución de la distribución del ingreso personal y el ingreso per cápita. Kuznets (1955) utilizó el ratio del porcentaje de ingreso correspondiente al 20 % más rico sobre el 40 % más pobre de la distribución de ingresos para Reino Unido, Estados Unidos, Puerto Rico, India y Sri Lanka. Al comparar los ratios de desigualdad con el ingreso per cápita de cada país, Kuznets (1955) encontró que los países más pobres como Sri Lanka y la India tenían ratios más bajos que Puerto Rico y Estados Unidos y Reino Unido ratios más bajos que el resto de países. Esta evidencia empírica validó en aquella época la hipótesis de U invertida sobre la desigualdad y el ingreso per cápita de los países e incentivó, años después, a formular la misma hipótesis para la relación entre emisiones e ingreso.

### 8.2. Curva de Kuznets Ambiental

Años más tarde del hallazgo que hiciera Kuznets (1955), la hipótesis inicial que establecía una relación de U invertida entre la desigualdad y el ingreso per cápita se adoptó en el campo de la economía ambiental para establecer la hipótesis de una relación de U invertida entre degradación ambiental y el ingreso per cápita de un país. Esto implica que en el estadio inicial de crecimiento de un país la degradación ambiental se incrementa de forma más que proporcional, pero pasado un punto de ingreso per cápita la degradación

empieza a disminuir. A esta hipótesis de forma funcional entre degradación y crecimiento se la denominó Curva de Kuznets Ambiental y se muestra en el siguiente gráfico.

Figura 1: Curva de Kuznets Ambiental



Desde la teoría se han planteado diversos factores que explican el efecto positivo que tiene el crecimiento económico sobre el ambiente a largo plazo. Según Paraskevopoulos (2009) existen dos factores principales que causan la forma de la CKA. El primer factor está relacionado a la historia económica de los países de altos ingresos y a los cambios estructurales que siguieron para lograr el crecimiento y el segundo factor está relacionado al cambio de preferencias de los individuos que demandarán mayor calidad ambiental a medida que aumenta el crecimiento económico.

En primer lugar, el cambio estructural que siguieron los actuales países desarrollados se puede describir a grandes rasgos de la siguiente manera: inicialmente fueron economías basadas en la agricultura que no generaban grandes impactos en el ambiente, luego con la industrialización la actividad se volvió intensiva en emisiones de GEI en general, por último, en las últimas décadas, estos países transitaron del sector fabril hacia el sector de servicios e información. Este cambio estructural dinámico resultó en la reducción de la degradación ambiental en los países de altos ingresos.

Sin embargo, esta explicación se contrapone con el hecho de que los países de altos ingresos no necesariamente han reducido la intensidad de contaminación de los productos que consumen. Esto se explicaría por la exportación de actividades contaminadoras a los países pobres a través de los procesos de outsourcing y offshore de empresas transnacionales.

En segundo lugar, el otro factor del crecimiento económico que influencia la reducción de emisiones es el cambio de preferencias de las personas que componen una sociedad.

Según Van Alstine y Neumayer (2010), la calidad ambiental se puede considerar desde la teoría económica como un bien normal o incluso de lujo, por lo que debería tener una elasticidad cercana a uno o superior a uno ante aumentos del ingreso. Según la teoría, cuando la economía pase un punto de inflexión de ingreso per cápita, las preferencias de los individuos y las del sector público cambian, por lo que se promocionan más políticas de cuidado del ambiente (Paraskevopoulos, 2009).

### **8.3. Crecimiento económico y crítica sobre la convergencia de degradación ambiental**

Se ha señalado, repetidas veces, a lo largo de este trabajo de investigación que la hipótesis sobre la existencia de una relación en forma de U invertida entre degradación ambiental y crecimiento puede no ser correcta por falta de evidencia empírica robusta que la valide. Al respecto, Arrow y cols. (1996) señala que como “[la hipótesis de U invertida] es consistente con la noción de que las personas gastan proporcionalmente más en calidad ambiental a medida que sus ingresos se incrementan, los economistas han conjeturado que la curva aplica para la calidad ambiental en general” (p.2). Sin embargo, esta conjetura que se ha formulado, sobre todo, desde la economía Neoclásica no toma en cuenta que la base de recursos naturales, que soporta las actividades antropicas, no podría sostener un crecimiento económico indefinido (Alier y Jusmet, 2015).

Existen tres razones para ser cautos al interpretar la hipótesis de CKA. Primero, la relación ha probado ser válida para contaminantes que producen costos locales y a corto-plazo (como el azufre, material particulado, etc.), no para los contaminantes de stock que implican costos a largo plazo y muy dispersos (como el CO<sub>2</sub>) que suelen crecer linealmente con el ingreso (Arrow y cols., 1996). Segundo, las relaciones de U invertida se han descubierto para algunas emisiones contaminantes, no para los stocks de recursos naturales que también es un indicador de degradación ambiental. La hipótesis de CKA es menos probable de ser válida si los efectos sobre stocks de recursos naturales como hectáreas de suelo cultivable, cobertura forestal, etc., son significativos (Arrow y cols., 1996).

Tercero, las relaciones de U invertida, como han sido estimadas, no explicarían las consecuencias que tiene la reducción de emisiones de ciertos contaminantes sobre todo el sistema (Alier y Jusmet, 2015; Arrow y cols., 1996). Por ejemplo, las reducciones de un contaminante realizadas en un país pueden significar el aumento de emisión de otro contaminante en el mismo país o transferencias de contaminantes a otros países, como se mencionó en el apartado anterior.

Los autores Arrow y cols. (1996) concluyen con una observación que sirve para el análisis de este estudio:

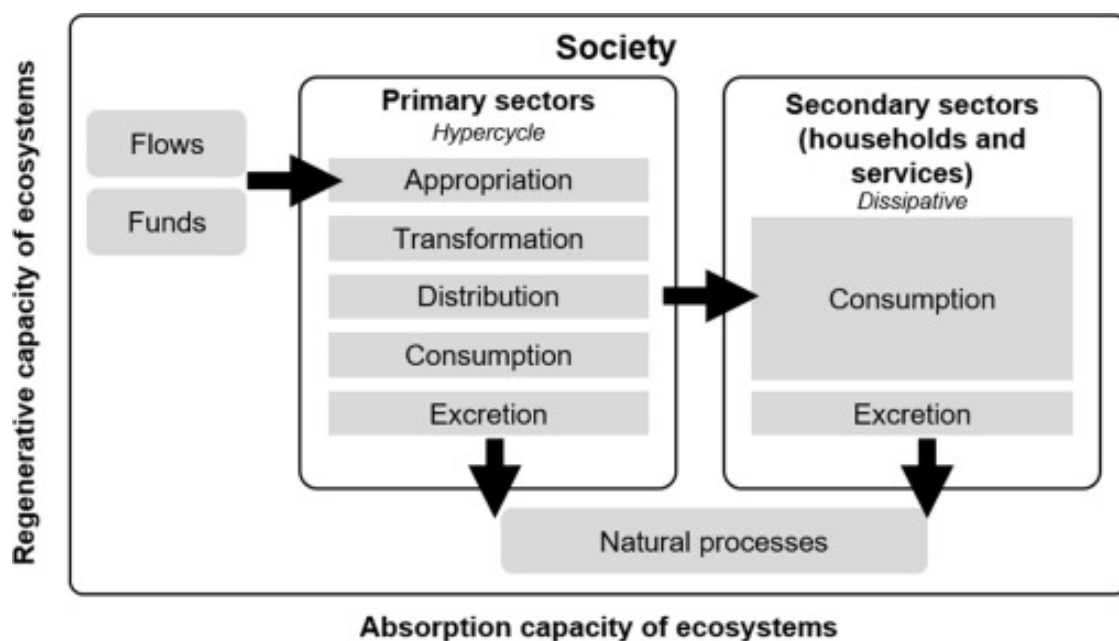
El crecimiento económico no es una panacea para la calidad ambiental; de hecho, ni siquiera es el problema principal. Lo que importa es el contenido del crecimiento: la composición de los insumos (incluidos los recursos ambientales) y los productos (incluidos los productos de desecho) (p.3).

## 8.4. Metabolismo social

El concepto de metabolismo social es adoptado por la rama de la economía ecológica representada principalmente por Nicholas Georgescu Roegen, Herman Daly y Kenneth Boulding. Este concepto comprende al sistema económico como un subsistema respecto a otro de complejidad superior que es la biosfera, por consiguiente los procesos de producción y consumo también se rigen por las leyes que gobiernan al sistema superior: leyes de termodinámica. En este sentido, la primera ley hace referencia al principio de conservación y la segunda a la ley de entropía. La primera establece que la materia y energía no se pierden sino se transforman y la segunda establece que los impactos de la actividad económica sobre el ambiente son irreversibles (Alier y Jusmet, 2015).

Bajo la primera ley de termodinámica se establece que el total de inputs (insumos) que entran al metabolismo social (sistema económico) tiene que ser necesariamente igual a los outputs (productos) del sistema. Desde este enfoque, entonces, se describe al proceso económico como un subsistema que utiliza inputs físicos para procesarlos en outputs, estos outputs pueden ser productos vendidos a otras economías o desechados al medio natural, este proceso puede ser explicado en el siguiente gráfico (Minaya Flórez, 2018).

Figura 2: Metabolismo social: entradas y salidas



En este pequeño diagrama se pueden apreciar los flujos mencionados. Por un lado,

se tienen las entradas de insumos al metabolismo que no son otra cosa que recursos naturales y bienes intermedios. Por otro lado, se tienen las salidas del sistema que son bienes, emisiones atmosféricas, efluentes líquidos y residuos materiales obtenidos luego del proceso económico. Estas cuentas se suelen registrar en toneladas y el objetivo de hacerlas es cuantificar la extracción, transformación, consumo y desperdicios finales de materiales.

## 9. Metodología

Para estimar empíricamente la relación dinámica entre degradación ambiental y crecimiento tomando como indicadores de ambos, respectivamente, las emisiones de CO<sub>2</sub> y el PIB per cápita, se utilizará una combinación de los modelos propuestos por Stern y Common (2001) y Zanin y Marra (2012). En primer lugar, Stern y Common (2001) proponen un modelo cuadrático simple como se muestra a continuación:

$$\ln\left(\frac{E}{POP}\right)_{it} = \alpha_i + \gamma_t + \beta_1 \ln\left(\frac{GDP}{POP}\right)_{it} + \beta_2 \ln\left(\frac{GDP}{POP}\right)_{it}^2 \quad (1)$$

Incluye un intercepto específico para cada país  $\alpha_i$  y otro intercepto que captura la influencia del tiempo  $\beta_t$ . Específicamente, estos autores estiman la ecuación 1 para las emisiones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en toneladas. Asimismo, como se señaló en los antecedentes, Stern y Common (2001) utilizaron bases de datos para todos los países del mundo, los de la OCDE y los no pertenecientes a la OCDE. En el caso de presente trabajo de investigación solo se estimará la función para Perú por lo que no se recurrirá a los interceptos específicos para cada país o momento del tiempo.

Dado que existe la posibilidad de que las variables no co-integren al estimar la función, Stern y Common (2001) toman un segundo paso y estiman el modelo en primeras diferencias logarítmicas. Este procedimiento tiene por objeto eliminar las tendencias estocásticas potenciales que pueden existir dentro de la serie.

$$\Delta \ln\left(\frac{E}{POP}\right)_{it} = \alpha_i + \gamma_t + \beta_1 \Delta\left[\ln\left(\frac{GDP}{POP}\right)_{it}\right] + \beta_2 \Delta\left[\ln\left(\frac{GDP}{POP}\right)_{it}^2\right] \quad (2)$$

En el caso en que existiera una relación de U invertida entre emisiones e ingreso per cápita, se podría calcular el nivel de ingreso per cápita de inflexión mediante la siguiente división sencilla:  $-\left(\frac{\beta_1}{2\beta_2}\right)$

En segundo lugar, Zanin y Marra (2012) postulan que la hipótesis de la CKA debe ser investigada sin imponer ninguna estructura en la especificación del modelo (e.g., lineal, cuadrático o cúbico); en cambio, el investigador debería dejar que los datos determinen si la relación es lineal o no-lineal. Para lograr este objetivo, los autores recurren al marco de referencia de regresión penalizada de spline. En general, las splines representan una



herramienta válida cuando la forma funcional no se conoce a priori, y la penalización evita el inconveniente de *overfitting*.

## 9.1. Modelo penalizado de spline

Dadas dos variables  $x_t$  y  $y_t$ , en el caso de este estudio PIB per cápita real y emisiones de CO2 per capita, se asume que la relación funcional que las relaciona se puede caracterizar como sigue

$$y_t = f(x_t) + \varepsilon_t, t = 1, \dots, T \quad (3)$$

donde  $f(\cdot)$  es una función de “suavizamiento” unidimensional,  $\varepsilon_t$  es el término de error y  $T$  es el tamaño de muestra. La función  $f(\cdot)$  puede ser representada por una combinación lineal de funciones base y parametros (Zanin y Marra, 2012). Para ilustrar la idea básica, la función de suavizamiento de la ecuación 3 se puede reemplazar, en este caso, por un spline base de regresión lineal cuadrática

$$f(x) = \delta_0 + \delta_1 x + \delta_2 x^2 + \sum v_k(x - k_k) \quad (4)$$

donde  $\delta_0$ ,  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  y  $v_k$  son los coeficientes de la regresión spline,  $k_k$  y  $k$  son nodos fijos  $(x - k_k) = \max(x - k_k, 0)$  Zanin y Marra (2012). Sin embargo, dependiendo del valor que tome  $k$ , es probable que ocurra *overfitting* o *underfitting*, por consiguiente socavando la utilidad práctica de los modelos de spline. Así, según los autores, es recomendable escoger  $k = \min(n/4, 40)$ , que la localización de los nodos esté distribuida de forma equidistante en todo el rango de los valores de las variable explicativas y finalmente penalizar los coeficientes de spline  $v_k$  para evitar *overfitting*.

La aproximación clásica a la estimación de los parámetros de las regresiones de spline es considerando el problema de mínimos cuadrados penalizados

$$\text{Minimizar}(y - B_x\beta)^2 + \lambda'D\beta \quad (5)$$

donde  $y$  es el vector de la variable respuesta,  $B$  es la matriz cuyas columnas corresponden al intercepto, a los predictores lineales y a las funciones base de las variable exógenas,  $\beta$  es el vector parámetros que contiene los coeficientes estimados del modelo,  $\lambda$  es un parámetro de suavizamiento y  $D$  es una matriz diagonal de penalización, dada por  $D = I_k$ , aunque los primeros elementos de la diagonal correspondientes a los estimadores lineales no están penalizados (Zanin y Marra, 2012). La solución de la ecuación 5 y los valores estimados de  $y$  son,

$$\hat{\beta} = (B'_x B_x + \lambda D)^{-1} B'_x y \quad ; \hat{y} = S_\lambda y \quad (6)$$

donde  $S_\lambda = B_x(B'_x B_x + \lambda D)^{-1} B'_x$ . Hay que recordar que el valor de  $\lambda$  controla el trade-off entre mayor bondad de ajuste del modelo a los datos y menor bondad de ajuste. Este parámetro de suavizamiento juega un rol crucial: si el valor  $\lambda$  es muy alto entonces la función spline suavizará en exceso el modelo y si el valor de  $\lambda$  es muy bajo la función spline no suavizará lo suficiente la función (Zanin y Marra, 2012). Ambos casos no son ideales, por lo cual, se necesita usar un método de selección del parámetro guiado por los datos, no por la discrecionalidad del investigador.

Para los modelos de regresión spline con una covariable, la selección de parámetros de suavizado a menudo se logra fácilmente mediante la optimización de búsqueda directa de la cuadrícula de un criterio dado, como la validación cruzada generalizada o el criterio de información de Akaike (p. 3 Zanin y Marra, 2012)

Los datos utilizados para realizar la estimación del modelo se obtuvieron de dos fuentes distintas. En el caso de las emisiones de CO2 per cápita, anualizadas en toneladas para todo el territorio nacional, los datos provienen de la base de datos del Global Carbon Project. En el caso del PIB per cápita los datos se obtuvieron de la base de datos del Proyecto Maddison. Estos datos de ingreso per cápita están en dólares de 2011 y toman en cuenta la diferencia de precios internacionales, es decir, están en paridad de poder adquisitivo.

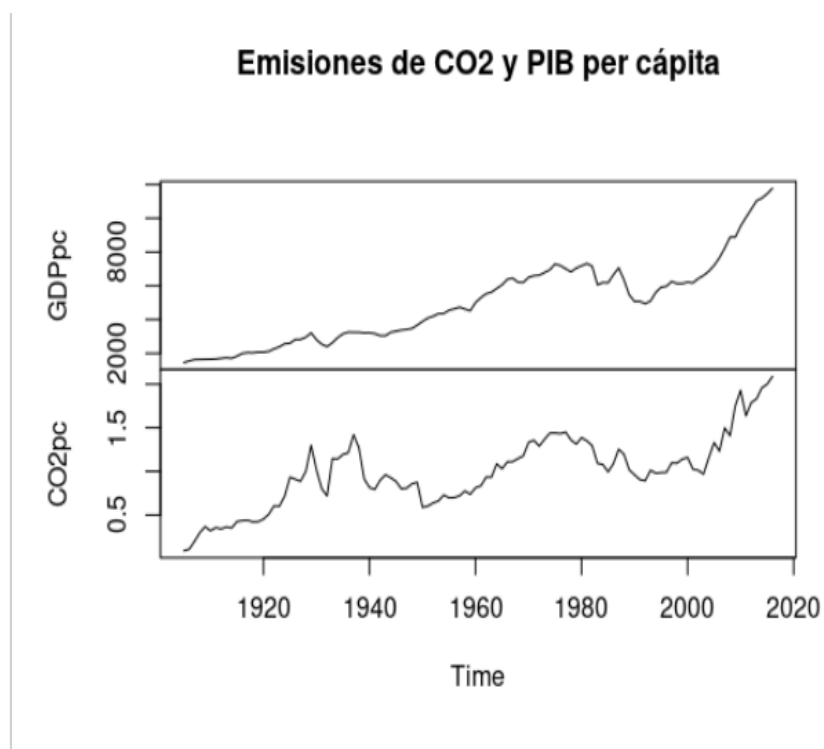
## 10. Resultados

A lo largo del presente estudio, se ha venido mencionando reiteradas veces que el resultado esperado es encontrar una relación creciente y cúbica entre emisiones de CO2 per cápita y el PIB per cápita. Se empieza primero dando un vistazo a los datos para observar que patrón develan en la figura 3.

Donde GDPpc es el nombre de la variable que representa al PIB per cápita y CO2pc es el nombre de la variable que representa a las emisiones de CO2 per cápita. Se aprecia que ambas son crecientes en el tiempo y parecen develar un componente de raíz unitaria. En efecto, el test de raíz unitaria de Phillips-Perron indica que el PIB per cápita posee raíz unitaria con un p-valor de 1 y CO2 per cápita también con un p-valor de 0.5. Asimismo, el test de cointegración de Phillips-Ouliaris denota que ambas variables en niveles no cointegran. Por estas razones, se tomó la primera diferencia de ambas variables y se realizaron los mismos test de raíz unitaria para ambas variables. Ambas son estacionarias para un nivel de significancia del 1 %. En esta caso la prueba de cointegración devela que ambas variables en primeras diferencias cointegran para un nivel de confianza de 1 %.

Realizadas estas exploraciones previas a la estimación del modelo, se espera encontrar una función de emisiones de CO2 cúbica y creciente con relación al PIB per cápita. En el siguiente cuadro se muestran los resultados para los modelos estimados en dos

Figura 3: Emisiones de CO2 y PIB per cápita



periodos separados, pues se ha encontrado varios quiebres estructurales. El modelo (1) comprende los años 1906-1949 y el modelo (2) comprende los años 1951-2016, se pierde una observación en cada modelo por la primera diferencia. Considere que todas las variables están en unidades per cápita. Se incluyen también, en los modelos, unas variables dummies para capturar efectos de quiebre estructural. La dummy “d1”, en el modelo (1), es igual a “1” en el período 1910 – 1949, en el resto de años es igual a cero, y en el modelo (2) es igual a 1 en el período 1951 - 2006, en el resto de años es igual a ceros. Los períodos que abarcan estas dummies se caracterizan por una alta volatilidad en las emisiones per cápita.

Cuadro 1: Resultados de los modelos estimados

	$\Delta \ln(CO_2)_t$ (1)	$\Delta \ln(CO_2)_t$ (2)
$\Delta PIB_t$	-1,486.6*** (-3.44)	106.27** (2.52)
$d1 * \Delta PIB_t$	1498.02*** (4.47)	-111.44*** (-2.55)
$\Delta PIB_t^2$	101.62*** (3.46)	-5.96** (-2.55)
$d1 * \Delta PIB_t^2$	-102.4*** (-3.48)	6.31** (2.60)
Constant	-0.00 (-0.16)	0.18*** (3.42)
d1*Cons		-0.17*** (-3.29)
Adj $R^2$	0.45	0.30
Prob >F	0.00	0.00
D-W	2.07	2.54

Elaboración propia

Donde \* significa un  $p < 0.10$ , \*\* significa un  $p < 0.05$  y \*\*\* significa un  $p < 0.01$

## 11. Discusión

El modelo se puede resumir en las siguientes ecuaciones:

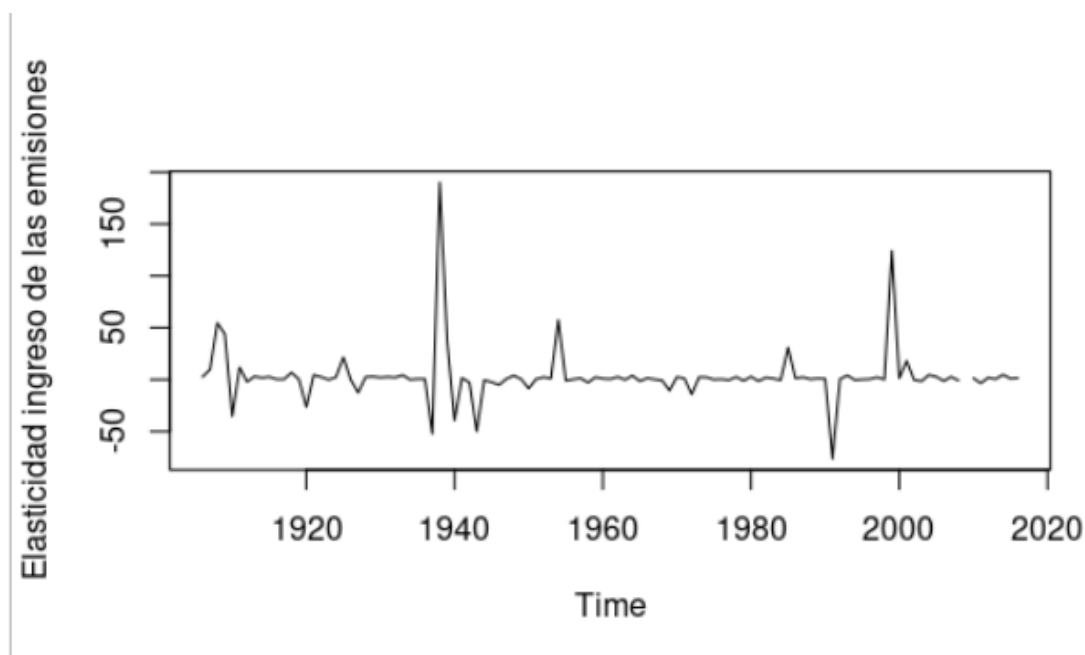
$$-1484,06\Delta PIB_t + 1498,02d1 * \Delta PIB_t + 101,62\Delta(PIB^2)_t - 102,4d1 * \Delta(PIB^2)_t \quad (7)$$

$$0,18 - 0,17d1 + 106,27\Delta PIB_t - 111,44d1 * \Delta PIB_t - 5,96\Delta(PIB^2)_t + 6,31d1 * \Delta(PIB^2)_t \quad (8)$$

Donde  $y_t$  es igual al logaritmo de las emisiones de CO2 per cápita y  $x_t$  es el logaritmo del PIB per cápita. A continuación se presenta la evolución de la elasticidad ingreso de la emisiones de CO2 para todo el período analizado.

La elasticidad media de las emisiones de CO2 respecto al PIB per cápita es 3.281, lo cual es bastante alto. Asimismo, como el modelo que se estimó explica la relación de la tasa de crecimiento de las emisiones de CO2 per cápita respecto a la tasa de crecimiento del PIB per cápita (primera diferencia de logaritmos) y el último tramo de la función estimada denota una relación de U invertida entre ambas tasa de crecimiento se encontró que la tasa de crecimiento de PIB per cápita de inflexión es 8.91 %, pero no solo hace

Figura 4: Elasticidad ingreso de las emisiones de CO2 (1906-2016)



falta alcanzar dicha tasa sino mantener un crecimiento igual a o mayor a la misma, lo cual es estructuralmente complicado que suceda para la economía peruana.

A grandes rasgos se puede decir que la hipótesis general del trabajo de investigación, relación directa y creciente entre crecimiento y emisiones, ha sido corroborada, aunque las especificaciones cúbicas no resultaron significativas por lo cual se las descartó. Además se puede ver que la hipótesis sobre una elasticidad emisiones-ingreso decreciente no se cumple pues la elasticidad no ha disminuido sino que se ha mantenido relativamente constante a lo largo del tiempo. Por último, la hipótesis sobre la inexistencia de un estado estacionario en el largo plazo sí se cumple, debido a que, según las proyecciones del modelo se necesitaría un crecimiento de PIB per cápita de 8.91 % sostenido en el tiempo lo cual no es realista dentro de las posibilidades de una economía pequeña, abierta y condicionada por los ciclos de producción internacional.

En particular, es importante resaltar lo expresado en la investigación de Diaz-Vazquez y cols. (2009), quién señaló pertinentemente que la variable de ingreso per cápita no solo no sería la única variable que explicaría una eventual reducción de las emisiones sino que, además, los efectos del incremento del ingreso no son significativos para explicar la reducción. Al respecto Stern y Common (2001) señalaron, respecto a otro indicador de degradación ambiental, que "el punto de inflexión para las emisiones de azufre es muy alto \$101,166 de PIB per cápita. En la misma línea, Arrow y cols. (1996) expresan que el contenido del crecimiento lo que importa, incluso más que el crecimiento mismo. En el caso peruano las principales fuentes de emisiones provendrían del sector primario minero y agrícola, así como también a las emisiones móviles del parque automotor, compuesto

por autos en mal estado. No obstante, pareciera que de todos estos la minería podría jugar un papel preponderante pues resulta sugerente encontrar que a partir de 2007, tres años antes del agotamiento del superciclo de los commodities, la relación entre emisiones y PIB per cápita cambie de forma hacia una U invertida. Esto podría denotar que la remoción de tierras (fuente de emisiones de CO<sub>2</sub> capturadas en el suelo) a gran escala producidas por la minería podrían ser significativas (Alier y Jusmet, 2015).

## 12. Conclusiones

El aumento de la degradación ambiental en el Perú, medido por las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita, ha sido permanente. Estudios científicos han probado que el aumento sostenido de CO<sub>2</sub> en la atmósfera esta ocasionando que el calentamiento global se incremente a niveles no vistos en eras geológicas previas. El cambio climático es uno de los efectos del calentamiento global e implica una mayor variabilidad climática caracterizada por el aumento de la ocurrencia de fenómenos meteorológicos extremos y la intensificación de los ya existentes, como El Niño Oscilación Sur, ENSO, por sus siglas en inglés (El Niño Southern Oscillation). El aumento de ocurrencia de estos fenómenos afecta sobre todo a los países pobres y subdesarrollados como el Perú y se intensifican aún más los efectos si se trata de países cercanos a la línea Ecuatorial.

Por todas estas razones, este estudio buscó encontrar una función dinámica que relacionara las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita y el PIB per cápita. Se estableció, como otros trabajos previos lo han hecho y por razonamiento lógico, que la variable de PIB per cápita causa a la variable de emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita. Esto es así porque al ser el metabolismo social, o sistema económico, un subsistema de la biosfera está también regido por las mismas leyes que gobiernan al sistema superior y estas son las leyes de la termodinámica (Alier y Jusmet, 2015). Así, el sistema de “producción” se caracteriza por extraer recursos naturales y transformarlos. El producto de este proceso son bienes de valor y desperdicios en forma de emisiones y en forma sólida. La segunda ley de la termodinámica establece que la acumulación de esos desperdicios y la generación de entropía no son reversibles por lo que no es cierto que el crecimiento económico pueda disminuir la degradación ambiental causada por la contaminación (Alier y Jusmet, 2015).

En este sentido, los estudios más recientes sobre la relación que guardan las emisiones de contaminantes, especialmente CO<sub>2</sub>, y el crecimiento económico estaría mejor caracterizada por una expresión cúbica. En este estudio hemos encontrado una relación cuadrática para las variables en primeras diferencias logarítmicas para los períodos 1906-1949 y 1950-2016. No obstante, es preciso señalar que el modelo tiene por lo menos cuatro quiebres estructurales identificados. El primero abarca desde 1906 hasta 1910, el segundo desde 1911 hasta 1949, el tercero desde 1950 hasta 2006 y el cuarto desde 2007 hasta

2016. En los cuatro períodos se intercalan formas de U y de U invertida, teniendo el último periodo forma de U invertida (2007-2016).

Sin embargo, como se ha señalado líneas arriba, el hecho de haber encontrado dicha relación de U invertido no implica que la disminución de las emisiones per cápita a través del incremento del PIB per cápita sea posible. La tasa de crecimiento del PIB per cápita de inflexión se calculó en 8.91 % anual de forma sostenida, lo cual no es posible alcanzar con la actual estructura productiva que depende del sector primario. Por último, la elasticidad emisiones-ingreso ha sido relativamente constante a lo largo de los años y ronda 3.21, un valor que denota el nivel de “suciedad” del crecimiento peruano. Así, es menester de los organismos rectores en materia ambiental del país realizar este tipo de estimaciones con el objeto de formular más y mejores políticas de cuidado y remediación ambiental a corto, mediano y largo plazo.

## Referencias

- Alcott, B., Giampietro, M., Mayumi, K., y Polimeni, J. (2012). *The jevons paradox and the myth of resource efficiency improvements*. Routledge.
- Alier, J. M., y Jusmet, J. R. (2015). *Economía ecológica y política ambiental*. Fondo de Cultura económica.
- Arrow, K., Bolin, B., Costanza, R., Dasgupta, P., Folke, C., Holling, C., ... others (1996). Economic growth, carrying capacity, and the environment. *Environment and Development Economics*, 1(1), 104–110.
- Byrne, M. M. (1997). Is growth a dirty word? pollution, abatement and endogenous growth. *Journal of Development Economics*, 54(2), 261–284.
- Davis, S. J., Caldeira, K., y Matthews, H. D. (2010). Future co2 emissions and climate change from existing energy infrastructure. *Science*, 329(5997), 1330–1333.
- Diaz-Vazquez, M. R., y cols. (2009). The dissociation between emissions and economic growth: the role of shocks exogenous to the environmental kuznets curve model. *Applied Econometrics and International Development*, 9(2).
- Eby, M., Zickfeld, K., Montenegro, A., Archer, D., Meissner, K., y Weaver, A. (2009). Lifetime of anthropogenic climate change: millennial time scales of potential co2 and surface temperature perturbations. *Journal of climate*, 22(10), 2501–2511.
- Fodha, M., y Zaghdoud, O. (2010). Economic growth and pollutant emissions in tunisia: an empirical analysis of the environmental kuznets curve. *Energy Policy*, 38(2), 1150–1156.
- Frölicher, T. L., y Joos, F. (2010). Reversible and irreversible impacts of greenhouse gas emissions in multi-century projections with the near global coupled carbon cycle-climate model. *Climate Dynamics*, 35(7-8), 1439–1459.

- Gillett, N. P., Arora, V. K., Zickfeld, K., Marshall, S. J., y Merryfield, W. J. (2011). Ongoing climate change following a complete cessation of carbon dioxide emissions. *Nature Geoscience*, 4(2), 83–87.
- Jiménez, F. (2017). Crecimiento y desindustrialización prematura en Perú 1950-2015, un análisis kaldoriano. *Economía*, 40(80), 155–222.
- John, A., y Pecchenino, R. (1994). An overlapping generations model of growth and the environment. *The economic journal*, 104(427), 1393–1410.
- John, A., Pecchenino, R., Schimmelpfennig, D., y Schreft, S. (1995). Short-lived agents and the long-lived environment. *Journal of public economics*, 58(1), 127–141.
- Kuznets, S. (1955). Economic growth and income inequality. *The American economic review*, 45(1), 1–28.
- Lacis, A. A., Schmidt, G. A., Rind, D., y Ruedy, R. A. (2010). Atmospheric CO<sub>2</sub>: Principal control knob governing Earth's temperature. *Science*, 330(6002), 356–359.
- Magnus, J. R., Melenberg, B., y Muris, C. (2011). Global warming and local dimming: The statistical evidence. *Journal of the American Statistical Association*, 106(494), 452–464.
- McConnell, K. E. (1997). Income and the demand for environmental quality. *Environment and development Economics*, 383–399.
- Minaya Flórez, G. A. (2018). La curva de Kuznets ambiental (CKA) basada en el indicador de consumo material doméstico (CDM): Perú, 1970-2015.
- Paraskevopoulos, D. (2009). An empirical analysis of the environmental Kuznets curve hypothesis over two centuries: Evidence from the UK and US. *Department of Economics University of Macedonia Thessaloniki*, 11–28.
- Selden, T. M., y Song, D. (1995). Neoclassical growth, the J curve for abatement, and the inverted U curve for pollution. *Journal of Environmental Economics and management*, 29(2), 162–168.
- Stern, D. I., y Common, M. S. (2001). Is there an environmental Kuznets curve for sulfur? *Journal of Environmental Economics and Management*, 41(2), 162–178.
- Stokey, N. L. (1998). Are there limits to growth? *International economic review*, 1–31.
- Van Alstine, J., y Neumayer, E. (2010). The environmental Kuznets curve. *Handbook on Trade and the Environment*, 2(7), 49–59.
- Zanin, L., y Marra, G. (2012). Assessing the functional relationship between CO<sub>2</sub> emissions and economic development using an additive mixed model approach. *Economic Modelling*, 29(4), 1328–1337.