

VERIFICACIÓN DE LA CURVA AMBIENTAL DE KUZNETS: EL CASO DE MEXICO

Maxwell Navarrete, Mauricio Brull, Arturo Torre, David Gómez y Diana G. Torres¹

Resumen.

Grossman y Krugman (1992) encontraron que los efectos de la liberalización económica en México llevaban a una forma de U invertida en la relación entre el crecimiento del ingreso y el uso del medio ambiente. Esta configuración en U invertida es comúnmente conocida como la Curva Ambiental de Kuznets (CAK). El objetivo de este trabajo es verificar si dicha relación de U invertida se presenta en México al considerar el periodo que va de 1980 a 2004. Para realizar la comprobación estadística se utiliza un modelo econométrico de cointegración por mínimos cuadrados ordinarios, donde la variable dependiente es la contaminación por dióxido de carbono, mientras que las variables independientes fueron el PIB *per cápita* y PIB *per cápita* al cuadrado. Los resultados estadísticos del presente estudio permitieron confirmar para México la relación hipotética planteada por la CAK.

Palabras clave: Dióxido de carbono, contaminación, ingreso per cápita

INTRODUCCIÓN

Kuznets y Simon (1955) argumentaron que la distribución del ingreso es más desigual a medida que aumenta el nivel de ingreso y desarrollo de las economías. No obstante, pasaron algunos años para que Grossman y Krugman (1992) encontraran una nueva relación entre el ingreso *per cápita* real y el nivel de contaminación. Esta relación es una curva en forma de U invertida llamada la Curva Ambiental de Kuznets. Ésta explica la influencia de los cambios en la calidad ambiental cuando un país enfrenta la transición entre pobreza y desarrollo industrial (Deacon & Norman, 2006). En la primera etapa de industrialización, en las sociedades poco desarrolladas, la preocupación por los contaminantes en el medio ambiente es relativamente baja. Sin embargo, conforme los niveles de ingreso aumentan, se adquieren nuevas tecnologías y hay una mayor valoración por el medio ambiente. Por lo tanto, los niveles de contaminación empiezan a disminuir hasta volver a los niveles iniciales de contaminación (Dasgupta, Laplante, Wang, & Wheeler, 2002). También es importante abordar la evolución teórica de la Curva Ambiental de Kuznets (CAK) como lo han hecho varios investigadores. Por ejemplo, Andreoni y Levison (2001) determinaron un modelo estático que explica los rendimientos crecientes a escala en la disminución del uso de tecnologías. Por otro lado, el modelo de Egli y Steger (2006) se utiliza para comprender cuándo ocurre el nivel máximo de contaminación, planteamiento fundamentado con un modelo dinámico

¹ Los puntos de vista expresados en este documento corresponden únicamente a los de los autores y no necesariamente reflejan las ideas del ITESM.

compatible tanto al crecimiento económico como a la mejora del medio ambiente a lo largo del tiempo. Johansson y Kriström (2007) presentan un modelo simple para explicar el fenómeno de la CAK desde la perspectiva microeconómica, definiendo las funciones de utilidad y de producción en una economía donde se tiene a la contaminación como un producto. Se determina que la utilidad es creciente al consumo, pero decreciente al consumo de contaminantes. Asimismo, Egli (2005), considerando el supuesto de rendimientos crecientes a escala (RCE) perpetuos en reducción, introduce un nuevo enfoque respecto a la contaminación negativa, que a su parecer la literatura no ha abordado adecuadamente. Pittel (2006) extiende el debate a los recursos no renovables.

La justificación del trabajo se debe a la relevancia existente en la relación entre crecimiento y contaminación. Esto es importante para las decisiones de política de desarrollo y para las decisiones en tratados comerciales, ya que en la diversa información que se puede encontrar acerca de este tema se discute el tratamiento de la contaminación desde la perspectiva de la teoría clásica en donde la contaminación no es parte del modelo de producción industrial, cosa que se esclarece un poco más con el surgimiento de la teoría neoclásica con el concepto de fallas de mercado y el concepto de externalidades negativas.

El estudio de la curva ambiental de Kuznets para el caso de México es importante, pues si se presenta, se podría decir que existe una senda más probable hacia un desarrollo sustentable. Por ello, el objetivo de este trabajo es conocer si existe una relación de U invertida en México con las variables de PIB *per cápita* y los niveles de contaminación.

El trabajo se encuentra dividido en seis partes. La primera es la introducción. La segunda presenta el marco teórico de la Curva Ambiental de Kuznets, sus conceptos y definiciones. La tercera sección contiene la revisión de literatura. La cuarta parte incluye y analiza los datos empleados. La información del dióxido de carbono proviene del Centro de Análisis de Información de Dióxido de Carbono (nombre en inglés: Carbon Dioxide Information Analysis Center), mientras que los datos del PIB *per cápita* provienen del Fondo Monetario Internacional. Las observaciones abarcan el periodo que va de 1980 a 2004. La quinta sección presenta la metodología y las herramientas econométricas que se utilizaron. En esta parte del trabajo se explica la implementación de un modelo econométrico de cointegración de mínimos cuadrados ordinarios. La variable dependiente de dicho modelo es la contaminación de dióxido de carbono, mientras que las variables independientes fueron el PIB *per cápita* y PIB *per cápita* al cuadrado. Sólo se utilizó la variable de dióxido de carbono para simplificar la investigación, cabe señalar que la información de otros contaminantes es menos disponible, por su parte, el dióxido de carbono es uno de los contaminantes más asociado a la actividad productiva. En la sexta sección se proporcionan los resultados generados por la estimación del modelo que señalan la existencia de una relación de U invertida entre la contaminación y PIB *per cápita* en México durante los años de 1981 hasta 2004, en esta misma sección se presentan las conclusiones.

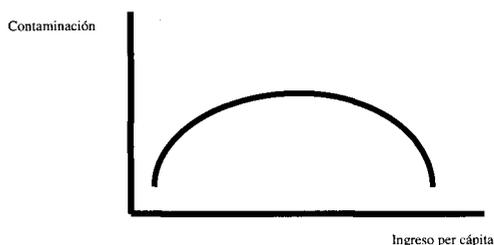
MARCO TEÓRICO

Hace medio siglo, Kuznets y Simon (1955) argumentaron que en el camino del desarrollo económico, el ingreso se distribuye de manera más desigual cuando una economía de un bajo nivel de ingreso pasa a un nivel intermedio de ingreso para luego convertirse en un país más equitativo conforme aumentan el nivel de ingreso y de desarrollo (Kuznets & Simon, 1955). Este patrón es conocido como la curva de Kuznets, una curva en forma de U invertida. La gráfica de una curva de Kuznets muestra al ingreso *per cápita* real en el eje horizontal y la medida de desigualdad de ingreso en el eje vertical. Generalmente, un índice que se utiliza para medir la desigualdad en la distribución del ingreso es el índice de Gini.

El concepto de la curva de Kuznets ha sido aplicado también al entendimiento de la relación existente entre el crecimiento productivo y el uso del medio ambiente, generando la Curva Ambiental de Kuznets (CAK). Ésta es una relación de una U invertida entre la contaminación y el ingreso, que determina una explicación de la influencia de los cambios de la calidad ambiental cuando un país entra en la transición de pobreza a un desarrollo industrial (Deacon & Norman, 2004).

Asimismo, la CAK predice que conforme el ingreso aumenta, la contaminación por unidad de producción tenderá inicialmente a aumentar, no obstante, si el crecimiento del ingreso es permanente, la contaminación tiende a disminuir. Cabe resaltar también que existe un punto máximo, después del cual, ante los incrementos del ingreso, la contaminación empieza a disminuir, este comportamiento se ilustra a continuación.

Fig. 1 Curva Ambiental de Kuznets



Grossman y Krueger (1991) fueron pioneros en el estudio acerca de los efectos de la liberalización económica en México y su influencia en los ingresos y el medio ambiente.

Hace medio siglo, algunos países europeos se encontraban en circunstancias económicas desfavorables por los daños de la Segunda Guerra Mundial. La reactivación de sus economías llevó también a la creación de nuevas industrias. Al generar nuevas zonas industriales, la contaminación, el crecimiento económico y el ingreso aumentaron, presentándose la relación de la Curva Ambiental de Kuznets. Después de los años

setentas, las naciones que se recuperaron económicamente de las guerras mundiales han decidido disminuir su contaminación conforme aumente su ingreso, ya que tanto los gobiernos y los ciudadanos han preferido tener un medio ambiente limpio (Deacon & Norman, 2004).

La lógica económica que explica la CAK sugiere que una sociedad poco desarrollada tiende a industrializarse con costos sociales muy altos, durante la primera etapa de la industrialización, la contaminación del medio ambiente aumenta porque las personas están más interesadas en conseguir trabajos y obtener un ingreso en lugar de aire limpio y agua pura. Asimismo, las comunidades son demasiado pobres para poder subsistir adecuadamente, por lo que el marco regulatorio del medio ambiente es olvidado, ya que existen objetivos sociales más importantes. Conforme el ingreso empieza a aumentar, las industrias líderes suelen adquirir nuevas tecnologías, los individuos van valorando más al medio ambiente y las instituciones regulatorias comienzan a incluir el cuidado del medio ambiente en su agenda. Cuando estas circunstancias se cumplen, la contaminación tiende a disminuir (Dasgupta, Laplante, Wang, & Wheeler, 2002).

La teoría de la Curva Ambiental de Kuznets ha ido evolucionando. Por ejemplo, Andreoni y Levison (2001) proponen un modelo estático que radica en explicar los rendimientos crecientes a escala en la disminución del uso de tecnologías. Este enfoque puede ser visto como una forma reducida de un gran número de modelos que se enfocan en muchos mecanismos diferentes (ejemplo: un cambio en tecnología o un cambio en las instituciones). El modelo específico de Egli y Steger (2007) se utiliza para comprender cuando ocurre el nivel máximo de contaminación derivado por otros factores que no sólo considera al ingreso *per cápita*, sino también considera a los factores de preferencia de un ambiente más limpio, los rendimientos crecientes a escala por el uso de nuevas tecnologías y la magnitud de otros efectos externos. Este planteamiento de Egli y Steger se fundamenta en un modelo dinámico que no sólo indica una relación de U invertida entre contaminación e ingreso per cápita, sino que también es compatible al crecimiento económico y a la mejora sostenida del medio ambiente a lo largo del tiempo. Con estas aseveraciones se puede determinar que en el nivel máximo de contaminación existe una disminución en el “consumo” de contaminación generado por un cambio de preferencia de un ambiente más limpio. Por tanto, el individuo se vuelve un agente importante en el desarrollo de un ambiente de menor contaminación, ya que conforme transcurre un periodo, los consumidores de una economía incrementan su ingreso y modifican sus preferencias.

Otro modelo que explica el fenómeno de la CAK desde la perspectiva microeconómica es el de Johansson y Kriström (2007). Estos autores definen las funciones de utilidad y producción en una economía donde se tiene a la contaminación como un producto y el uso de la tecnología en sector productivo de la sociedad. La función de utilidad de los individuos depende del consumo y de la contaminación. La utilidad es creciente al tener mayor consumo (c) y disminuye al consumir más contaminación (p). La función de utilidad se representa así:

$$U(c, p)$$

donde $U_c > 0$ y $U_p < 0$. Como también la doble derivada representa $U_{cc} < 0$ y $U_{pp} > 0$. Por otra parte, la producción de la sociedad se compone por una función cóncava de producción que depende de la contaminación y la tecnología. La función de producción se define así:

$$g(p, t)$$

donde p y t son insumos con las siguientes condiciones: $g_p > 0$, $g_t > 0$, y $g_{pt} > 0$. Por lo tanto, la sociedad maximiza el bienestar en un punto óptimo, por lo que se plantea la solución al siguiente problema:

$$\text{Max } U(c, p) \text{ s.a. } c = g(p, t)$$

donde la condición de primer orden es : $-\frac{U_p}{U_c} = g_p$

Con este modelo, Johansson y Kriström (2007) comprueban que en el largo plazo existe un efecto sustitución y un efecto ingreso en el consumo de la contaminación. Esto ocurre porque conforme aumenta el ingreso, las nuevas tecnologías son implementadas en las industrias, generando una reducción tanto en la producción como en el deseo de consumir la contaminación.

Egli (2005) argumenta que los modelos con una reducción explícita de tecnología y contaminación neta generalmente muestran que tanto la contaminación definida como una variable de 'stock' o bien definida como una variable de flujo puede volverse negativa. Considera que la forma en que la literatura aborda la contaminación negativa no es del todo adecuada. En primera instancia, discute tres enfoques, el de la restricción a soluciones interiores y acerca de la consideración de una limitante adicional de no-negatividad para la contaminación. Se argumenta que este procedimiento no es del todo satisfactorio, dada su naturaleza meramente técnica y no consecuencia de una función más realista. Posteriormente, se discute el planteamiento empleado por Brock y Taylor (2004), en donde se propone una solución al problema de contaminación negativa convirtiendo la función original de contaminación, con la contaminación neta como diferencia entre contaminación bruta y reducción a una función alineada con la intensidad de las emisiones. Sin embargo, este enfoque no constituye una solución general, sino que argumenta que en algunas ocasiones es necesario un progreso tecnológico adicional para lograr la forma ya mencionada por otros autores para la relación contaminación-ingreso.

En una segunda etapa, introduce un nuevo enfoque para evitar la contaminación negativa. Considerando el supuesto de rendimientos crecientes a escala (RCE) perpetuos en reducción, propone un mecanismo de 'rendimientos crecientes a escala transparentes'. Con una restricción continua de los RCE hasta que la reducción en tecnología muestre rendimientos constantes a escala (RCOE) en el límite, la relación contaminación-ingreso puede ser potencialmente caracterizada por niveles de contaminación no-negativos en el

largo plazo. Inclusive este nuevo enfoque no representa la “panacea”; esto es porque su aplicación general no está dada, pues el mecanismo sólo puede ser empleado en modelos CAK con modelación explícita de RCE en reducción. Además, Egli (2005) comenta que se requiere más investigación para una especificación funcional adecuada que muestre la restricción necesaria acerca del nivel de RCE requerido (Egli 2005).

Karen Pittel (2006) extiende el debate de las curvas ambientales de Kuznets a los recursos no renovables—para discutir los elementos que podrían propiciar el surgimiento de las CAKs en este caso. Su estudio se desvía de aquellos más convencionales en dos sentidos: Primeramente, se argumenta que las CAKs pueden aplicarse para determinadas variables de ‘stock’, tales como minerales y desperdicios (la mayoría de las curvas son analizadas para variables de flujo); y en segundo lugar, Pittel ofrece una explicación alternativa mostrando que las CAKs pueden darse simplemente por la combinación entre reciclaje y la escasez creciente de materiales. Demuestra que una CAK de recursos no-renovables puede surgir durante la transición hacia la senda de crecimiento de largo plazo. Una de las fuerzas impulsoras es la escasez en aumento de este tipo de recursos en una economía creciente. La reducida disponibilidad de recursos ‘puros’ en combinación con una tasa de ahorro cada vez mayor durante la etapa de desarrollo de los países puede propiciar el surgimiento de una CAK. La curva puede surgir o no dependiendo de la fase de desarrollo alcanzada por la economía, pero además se consideran las preferencias y la tecnología.

Pittel (2006) plantea supuestos referentes a la habilidad de las empresas de reciclaje de internalizar la interrelación entre las decisiones de reciclaje hoy y la disponibilidad futura de material de desperdicio reciclable con respecto a los prerequisites para una CAK y su velocidad de convergencia. Dicha internalización implica que una economía puede adentrarse en una trampa de pobreza; podría no tener la capacidad de converger al equilibrio de largo plazo si su dotación inicial de recursos y capital es bajo.

La teoría de la Curva Ambiental de Kuznets es relativamente nueva para la teoría económica. Varios autores señalan distintas conclusiones acerca de la relación entre contaminación y PIB *per cápita*. En la siguiente sección se podrán apreciar tanto perspectivas diferentes como la evolución de la CAK.

REVISIÓN DE LITERATURA

Desde el surgimiento en 1991 de la Curva Ambiental de Kuznets, se han propuesto diversos refinamientos y explicaciones acerca del impacto ambiental que los países en desarrollo podrían experimentar en su camino a la transformación y el crecimiento económico (Grossman y Krueger, 1991). Importantes autores soportan la hipótesis de la existencia de una curva ambiental de Kuznets (Cole, 2004, Millimet et. al, 2003, Lomborg, 2001, Shafik, 1994, Beckerman, 1992; Grossman y Krueger, 1991) y también algunos opositores que señalan la existencia de fallas en la metodología empleada para estos estudios (Verbeke y De Clercq, 2004, Perman y Stern, 1999, Stern et al, 1998, Arrow et al, 1995).

El debate teórico y empírico sobre la relación existente entre crecimiento económico y daño ambiental ha sido objeto de una amplia discusión en dos asuntos centrales: la forma de dicha relación; y la metodología empleada para probarla. En lo referente a las variables que se utilizan para medir el grado de contaminación, Cole et. al. (1997) prueba la hipótesis con siete diferentes variables, Perman y Stern (2003) verifican la existencia de cointegración entre las variables, Stern (1998), estudia el efecto de no-estacionalidad en las series, Lieb (2004) expone la confusión presentada por resultados entre variables de flujo y de stock para la guía de políticas, y Verbeke y De Clero (2004) estudian el hecho de que el orden de integración en las series puede llegar a afectar la consistencia de los resultados.

La hipótesis planteada por la CAK también ha sido aplicada al campo del comercio internacional, se especula que la diferente regulación ambiental entre países, puede alterar las ventajas comparativas y por ende los flujos comerciales, sobre todo cuando se habla de la relación entre los países desarrollados y en desarrollo. Diversos estudios (Janicke et al., 1997, Jaffe et al., 1995; Birdsall y Wheeler, 1993, Tobey, 1990) han encontrado poca evidencia de que los flujos comerciales respondan a diferenciales de control ambiental. Para el caso particular de México, Jáuregui, González, Salazar y Rodríguez (2008), verifican la existencia de la CAK.

La literatura también trata acerca de la intensidad de la contaminación de los flujos comerciales entre países desarrollados y aquellos en vías de desarrollo, la relación puede ser explicada por una tendencia de los países desarrollados a importar sus bienes intensivos en contaminación de países en desarrollo. Un ejemplo de esto se puede encontrar en Cole (2004), donde se estima la proporción de las exportaciones netas de algunos países hacia diferentes regiones haciendo distinción entre bienes altamente contaminadores y limpios. Los resultados de este autor fueron inconclusos, ya que solo para ciertos sectores de determinados países se mostró este efecto; por ejemplo, en el caso de Inglaterra y Asia se encontró únicamente en productos químicos y minerales no metálicos para el periodo de 1980 a 1990. En el caso de México, Jáuregui et al. al emplear información por entidad federativa, encuentran que la mayor apertura al comercio exterior se relaciona con mayores índices de contaminación.

Otra vertiente descarta la explicación que contempla los flujos comerciales y observa la relación entre consumo de bienes intensivos en contaminación y el crecimiento económico. Esta es más directa, ya que cuenta la producción tanto local como extranjera y busca explicar esto con las decisiones de consumo, este origen empata con el argumento teórico presentado en Johanson y Kristrom (2007). Stern et al. (1996) y Chapman (1999) aceptan este enfoque, aún y cuando advierten que no existe un supuesto que haga esta relación completamente factible.

Muchos de los estudios teóricos acerca de los determinantes de esta relación también han llegado a enfocarse en que no existe un supuesto factible que relacione la tecnología y las preferencias en el tiempo con el daño tecnológico (Stern, 1998; Stokey, 1998, McConnell 1997, John y Pecchenino, 1994, y Lopez, 1994). Sin embargo, este contraargumento bien se puede ver ya eliminado ante el surgimiento de modelos dinámicos que explican esta

relación (Egli y Steger, 2007 y Pittel, 2006), así como evidencia reciente en donde incorporan el uso de tecnología y las preferencias para explicar la forma de la relación entre ingreso y contaminación (Johanson y Kristrom, 2007).

A pesar de la existencia de severas críticas, el estudio de la relación entre la contaminación y el ingreso ha persistido y atiende a la creciente necesidad de entender cómo este fenómeno permea a las acciones de política y sustentabilidad. Su experimentación se ha enriquecido gracias a la existencia de una mayor información sobre el medio ambiente y la mejor comprensión de su rol en el desarrollo. Han surgido autores que experimentan resultados con variables no tradicionales, tales como pérdida de biodiversidad Escapa (2000), desechos nucleares Wang y Bohara (1998) y daño a los animales Frank (2008), lo cual deja ver la actual persistencia en la búsqueda acerca de la relación tanto por trabajos teóricos como empíricos.

En la actualidad se puede encontrar que estas necesidades buscan dar respuesta a la problemática de la búsqueda por el desarrollo y los efectos adversos que esto ha ocasionado al medio ambiente. No solamente se trata de un debate científico y académico, y la cuestión principal no es si el fenómeno de la curva de Kuznets se presenta para todos los contaminantes existentes o si esta curva ha surgido como un artefacto metodológico como lo sugieren Spangenberg (2001) y Millimet et al. (2003), sino que la preocupación real está en cómo se da la relación entre estos dos fenómenos y cómo ésta puede ser utilizada para dirigir esfuerzos que se traduzcan en bienestar económico y ambiental.

En la siguiente página se muestra una tabla que presenta evidencia de los resultados encontrados por diversos autores acerca de la relación entre diferentes medidas de contaminación e ingreso *per cápita* para la hipótesis de Kuznets.

Curva Ambiental de Kuznets: Resumen de la evidencia empírica.

Autor(es)	Variable de flujo					Variable Stock	
	SO ₂	SPM	NO _x	CO	CR	basura	CO ₂
Grossman y Krueger (1993)	∩	∩	∩				
Selden y Song (1994)	∩	∩	∩				
Shafik (1994)	∩	∩	∩		∩	↗	↗
Grossman (1995)	∩	∩	∩	∩			
Grossman y Krueger (1995)	∩	∩	∩		∩		
Holtz-Eakin y Selden (1995)	∩	∩	∩				↗
Panayotou (1995)	∩	∩	∩				
Carson et al. (1997)	∩	∩	∩	∩	∩		∩
Cole et al. (1997)	∩	∩	∩	∩	∩	↗	∩
Lim (1997)	∩	∩	∩		∩		∩
Moomaw y Unruh (1997)							∩
Panayotou (1997)	∩						↗
Robert y Grimes (1997, p. 192)							↗
Kaufmann et al. (1998)	∩						
Schmalensee et al. (1998)	∩						∩
Scruggs (1998)	∩	∩					
Torras y Boyce (1998)	∩	∩			∩		
Wu (1998)	∩	∩					
Agras y Chapman (1999)							∩ ↗
List y Gallet (1999)	∩		∩				
Barrett y Graddy (2000)	∩	∩	∩	∩	∩		
Cavlovic et al. (2000)	∩	∩	∩	∩	∩		↗
Cole (2000, p.112)	∩	∩	∩				
Dinda et al. (2000)	∩	∩					
Hettige et al. (2000)	∩			∩			
List y Gerking (2000)	∩		∩				
Perrings y Ansuategi (2000)	∩						↗
Halkos y Tsionas (2001)							↗
heil y Selden (2001)							↗
Minliang et al. (2001)						↗	
Roca et al. (2001)	∩						↗
Stern y Common (2001)	∩ ↗						↗
Barrett y Graddy (2000)	∩						↗
Hill y Magnani (2002)	∩		∩				∩ ↗
Cole y Elliott (2003)	∩		∩				
Friedl y Gietzner (2003)	∩						∩
Millimet et al. (2003)	∩		∩				
Martinez et al. (2004)							∩
Auchi y Bechetti (2005)							∩
Cole (2005)	∩						∩
Diikgraaf y Vollebergh (2005)							∩
Mazzanti et al. (2007)			∩	∩			∩
Ordás (2007)	∩	∩		∩			∩
Brajer et al. (2008)	∩	∩					
Flores (2008)			∩				

Monotónicamente creciente

U - Inversa

Forma - N

SO₂-dióxido de azufre

PMS -materia particulada suspendida

CR - contaminación en ríos

Desperdicios

CO₂-dióxido de carbonoNO_x -dióxidos de nitrógeno

CO -monóxidos de carbono

Elaboración propia con hallazgos de diferentes autores

METODOLOGÍA

Grossman y Krueger (1991), plantean la relación entre actividad económica y emisión de contaminantes. Observan que si las exportaciones de un país aumentan, esto se traduce en una mayor actividad económica, por lo que se espera que la contaminación se incremente en una relación de U invertida.

Para demostrar que para el caso de México se da esta relación de U invertida entre contaminación y actividad económica, se propone lo siguiente:

$$CO2_t = \alpha_0 + \beta_1 GDP_t + \beta_2 GDP_t^2 + u_t \quad (1)$$

donde $CO2$ representa las emisiones de dióxido de carbono, la variable GDP es el PIB per cápita, U denota el error de especificación del modelo y t es la periodicidad anual de los datos. Teóricamente estas variables presentan una relación importante, ya que se argumenta que cuando una nación comienza un proceso de industrialización, tiende a adoptar tecnologías de producción sucia porque valora más el ingreso que puede obtener aún sacrificando el propio aire limpio que pueda existir, sin embargo, al crecer el ingreso, los individuos empiezan a valorar más el medio ambiente y la búsqueda por tecnologías amigables al ecosistema se hace palpable. Dado lo anterior los niveles de contaminación tienden a reducirse.

Sólo se utilizó la variable de $CO2$ por fines prácticos, ya que los datos que existen de contaminación no son abundantes. Por ejemplo para dióxido de sulfuro no se encontraron datos disponibles para México. Cabe mencionar que esta es una limitación de la investigación, pues, la CAK tiene como variable la contaminación agregada, y no sólo una variable. Para México, Jáuregui et al, construyeron un índice de contaminación que contempla diversas formas de contaminación y que pondera para dar mayor importancia a los contaminantes más tóxicos para el ser humano, pero dicho índice, elaborado por entidad federativa, contempla aún sólo 4 años.

Otra consideración importante para efectos de este estudio es que se está considerando que las variables al ser series de tiempo estén cointegradas. Esta relación ocurre cuando las variables en cuestión son no estacionarias, pero la combinación lineal entre ellas sí lo es. Existen una serie de pruebas estadísticas que son necesarias para saber si se presenta este fenómeno entre las variables bajo estudio. Hay dos prerequisites importantes para poder inferir que esta relación se presente, primeramente que ambas series de datos presenten el mismo orden de integración (esto es el número de veces que se debe sacar la diferencia para que la serie se haga estacionaria) y por su parte, que se dé la causalidad de Granger en al menos un sentido. Si lo anterior se cumple se puede utilizar el método de mínimos cuadrados ordinarios evitando así crear una regresión espuria.

DATOS

Para realizar el presente estudio se utilizó una serie de tiempo del PIB *per cápita* de 1980 a 2004 (basado en la paridad de poder de compra medido en billones de dólares)

obtenidos de la página de estadísticas del Fondo Monetario Internacional. Por otro lado para obtener los datos acerca de las emisiones anuales de dióxido de carbono *CO2* se consultó al Centro de Análisis de la Información para el Dióxido de Carbono, organismo perteneciente al Departamento de Energía de los Estados Unidos de América. Asimismo como se mencionó en el apartado anterior se mostró que la condición de las series de datos debe ser del mismo orden de integración. En la tabla siguiente se muestra que en efecto ambos prerequisites se cumplen y por ende es factible hacer una regresión por Mínimos Cuadrados Ordinarios.

Debido a que se trabaja con series de tiempo, se necesita saber si los datos utilizados presenta la propiedad de ser estacionarios, de no ser así se debe manejar los datos con diferentes técnicas estadísticas para evitar que las regresiones sean espurias. Para fines prácticos del estudio se encontró que los datos en efecto no son estacionarios, pero que son del mismo orden de integración y que además si hay causalidad de Granger en un sentido.

Tabla 1. Pruebas de estacionalidad

Variable	En niveles	En primera diferencia
CO2	0.4403	0.0002*
GDP	0.9392	0.0057*
GDP2	1	0.0142*

Fuente: Elaboración propia

*Significativo al 5%.

En la tabla anterior, se pueden observar los valores *p* para las pruebas de estacionalidad de cada variable que se utiliza en el modelo. Claramente se puede ver que de las variables en niveles ninguna presenta la propiedad de estacionalidad, sin embargo en primera diferencia todas pasan la prueba, dando pauta para continuar con nuestra investigación. A continuación, presentamos las pruebas de causalidad de Granger.

Tabla 2. Pruebas de Causalidad de Granger

Hipótesis nula	Valor P
CO2 no Granger causa a GDP	0.28315
GDP no Granger causa a CO2	0.07156*

Fuente: Elaboración propia

*Significativo al 10%.

En la tabla 2 se puede observar que existe causalidad de Granger en al menos un sentido, esto es que el PIB causa las emisiones de *CO2*. Dadas estas pruebas estadísticas, la de estacionalidad y la de la causalidad de Granger, podemos aplicar el método de mínimos cuadrados ordinarios a nuestros datos.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

A continuación aparece la ecuación estimada.

Tabla 3. Regresión usando mínimos cuadrados ordinarios

	Emisiones anuales de CO ₂
Constante	41630.74* [8836.177]
PIB per cápita	160.3406* [27.72824]
PIB per cápita al cuadrado	-0.08437* [0.019748]
R ² Ajustada	0.843854

Fuente: Elaboración propia.

*Significativo al 5%

En esta tabla se ve que la relación de las emisiones anuales de dióxido de carbono respecto al término lineal del PIB per cápita es positiva, lo que nos dice que si crece el PIB así lo harán las emisiones de contaminantes a la atmósfera. Por otra parte, se observa que el signo del término cuadrático es negativo, esto implica que en una segunda etapa, cuando el PIB se incrementa, las emisiones de dióxido de carbono se reducen. Dados los signos que presentan nuestras estimaciones se debe notar que hay efectos contrarios, ya que un término crece mientras que el otro decrece.

Durante la realización de este estudio se abordaron otras formas funcionales. Concretamente se intentó agregar más variables explicativas, como el PIB per cápita al cubo o a la cuarta potencia, sin embargo esto no fue posible, ya que dichas variables nuevas no presentan el mismo orden de integración que el PIB per cápita lineal, cuadrático y las emisiones de CO₂. Lo anterior es de suma importancia ya que si se agregan más términos independientes que no poseen el mismo orden de integración que las demás variables se corre el riesgo de obtener una regresión espuria con la cual no se podría concluir nada de manera confiable acerca del fenómeno.

Por otra parte cabe mencionar que se realizaron cálculos de elasticidad, lo cual es de relevancia ya que determinará qué tan sensible es una variable respecto al cambio porcentual de otra. En nuestro caso se analizará qué tan sensible es la emisión de contaminantes a un cambio porcentual de 1% en el PIB per cápita.

$$\frac{\Delta\%CO_2}{\Delta\%PIB} = \frac{dCO_2}{dPIB} \cdot \frac{PIB}{CO_2} \quad (2)$$

Para evaluar la elasticidad se toma la ecuación 2. Dado que se tiene una relación causal entre las variables y que además se tiene una estimación de las mismas, se puede calcular en cuanto cambian las emisiones de CO_2 cuando el PIB per cápita se incrementa en 1%.

$$\varepsilon = (\beta_1 + 2\beta_2 * GDP)(PIB/CO_2) \quad (3)$$

$$\varepsilon = [160.34 + 2(-0.08437)*PIB]*[649.18/105449.8]$$

$$\varepsilon = 0.3197$$

Dados los resultados de la estimación cuadrática que se hizo de la relación entre contaminación y PIB per cápita calculamos la elasticidad a partir de la ecuación 3. Se observa que el resultado es 0.3197, es decir que por un aumento del PIB per cápita de 1% el aumento en la contaminación será de 0.3197%.

El que se dé una relación positiva con el PIB per cápita y una negativa con este mismo al cuadrado, es lo que hace que se compruebe la hipótesis inicial de que la relación entre ambas variables sigue la forma de una U invertida. Se concluye, para efectos de este estudio, que para México la relación entre las variables aquí analizadas sí sigue la forma de U invertida. En ese sentido la presente investigación es congruente con buena parte de los estudios consultados.

Sin embargo siguen en el aire preguntas de interés. Es cierto que se demostró la relación que tienen las variables de estudio, pero se desconoce aún el mecanismo de transmisión a detalle. Posteriores investigaciones del tema podrían abordar el estudio de estos posibles mecanismos a través de la relación en las preferencias del consumidor o ya sea mediante un análisis de la industrialización y evolución comercial de un país determinado para saber por qué es que se da la relación.

La existencia de esta relación es un gran avance en materia de evidencia económica sin embargo deben seguirse buscando las variables económicas, sociales e institucionales que están detrás del comportamiento de esta causalidad.

REFERENCIAS

- Agras, J., & Chapman, D. (1999). A Dynamic Approach to the Environmental Kuznets Curve hypothesis. *Ecological Economics*, 28 (2) 267-277.
- Andreoni, J., & Levison, A. (2001). The simple analytics of the environmental Kuznets curve. *Journal of Public Economics*, 80 (2), 269-286.
- Arrow, K., Bolin, B., Costanza, R., Dasgupta, P., Folke, C., Holling, C., et al. (1995). Economic growth, carrying capacity and the environment. *Ecological Economics*, 15 (2), 91-95.
- Auchi, S., & Becchetti, L. (2006). The stability of the adjusted and unadjusted environmental Kuznets curves. *Ecological Economics*, 60 (1), 282-298.
- Beckerman, W. (1992). Economic growth and the environment: whose growth? Whose environment? *World Development*, 20 (4), 481-496.
- Birdsall, N. & Wheeler, D. (1993). Trade Policy and Industrial Pollution in Latin America: Where are the Pollution Havens? *Journal of Environment and Development*, 2(1), 137- 49.
- Brock, W. & Taylor, M. (2004). The Green Solow Model. *NBER Working Papers No. 10557*
- Carson, R. T., Jeon, Y., & McCubbin, D. R. (1997). The Relationship between Air Pollution Emissions and Income: US Data. *Environment and Development Economics*, 2 (1), 433-450.
- Cavlovic, T. A., Baker, K. H., Berrens, R. P., & Gawande, K. (2000). A Meta-Analysis of Environmental Kuznets Curve Studies. *Agricultural and Resource Economics Review*, 29 (1), 32-42.
- Chapman, D., & Agras, J. (1999). A dynamic approach to the environmental Kuznets curve hypothesis. *Ecological Economics*, 28 (2), 267-277.
- Cole, M. (2004). Trade, the pollution-haven hypothesis and the environmental Kuznets curve: examining the linkages. *Ecological Economics*, 48 (1), 71-81.
- Cole, M. A., Elliott, R. J., & Shimamoto, K. (2005). Why the grass is not always greener: the competing effects of environmental regulations and factor intensities on US specialization. *Ecological Economics*, 54 (1), 95-109.
- Cole, M. A., Rayner, A. J., & Bates, J. M. (2001). The Environmental Kuznets Curve: An Empirical Analysis. *Environment and Development Economics*, 2 (4), 401-406.

- Dasgupta, S., Laplante, B., Wang, H., & Wheeler, D. (2002). Confronting the Environmental Kuznets Curve. *Journal of Economic Perspectives*, 16 (1), 147-168.
- Deacon, R. T., & Norman, C. S. (2006). Does the Environmental Kuznets Curve Describe How Individual Countries Behave? *Land Economics*, 82 (2), 291-315.
- Dijkgraaf, E., & Vollebergh, H. (2005). A Test for Parameter Homogeneity in CO2 Panel EKC Estimations. *Environmental & Resource Economics*, 32 (2), 229-239.
- Egli, H., & Steger, T. M. (2007). A Dynamic Model of the Environmental Kuznets Curve: Turning Point and Public Policy. *Environmental & Resource Economics*, 36 (1), 15-34.
- Egli, Hannes. (2005). A New Approach to Pollution Modelling in Models of the Environmental Kuznets Curve. *Swiss Journal of Economics and Statistics*, 141 (3), 459-473.
- Escapa, M. (2000). Economic growth and greenhouse gas emissions. *Ecological Economics*, 40 (1), 23-37.
- Frank, J. (2008). Is there an animal welfare Kuznets curve? *Ecological Economics*, 66 (2-3), 478-491.
- Friedl, B., & Getzner, M. (2003). Determinants of CO2 Emissions in a Small Open Economy. *Ecological Economics*, 45 (1), 133-148.
- Grossman, G. M., & Krueger, A. (1991). Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement. *NBER Working Papers*, No. 3941
- Halkos, G. E., & Tsonas, E. G. (2001). Environmental Kuznets Curves: Bayesian Evidence from Switching Regime Models. *Energy Economics*, 23 (2), 191-210.
- Heil, M. T., & Selden, T. M. (2001). Carbon Emissions and Economic Development: Future Trajectories based on Historical Experience. *Environment and Development Economics*, 6 (1), 63-83.
- Hill, R. J., & Magnani, E. (2002). An Exploration of the Conceptual and Empirical Basis of the Environmental Kuznets Curve. *Australian Economic Papers*, 41 (2), 239-254.
- Holtz-Eakin, D., & Selden, T. M. (1995). 'Stocking the Fires? CO2 Emissions and Economic Growth. *Journal of Public Economics*, 57 (1), 85-101.
- Jaffe, A. & Stavins, R. (1995). Dynamic Incentives of Environmental Regulation: The Effects of Alternative Policy Instruments on Technology Diffusion. *Environmental*

& *Economic Management*, 29 (3), 29-1.

- Janicke, M., Binder, M., & Monch, H. (1997). Dirty industries: patterns of change in industrial countries. *Environmental and Resource Economics*, 9 (4), 467-491.
- Johansson, P.-O., & Kriström, B. (2007). On a clear day you might see an environmental Kuznets curve. *Environmental Resource Economy*, 37 (1), 77-90.
- John, A., & Pecchenino, R. (1994). An overlapping generations model of growth and the environment. *Economic Journal*, 104, 427: 1393-1410.
- Kuznets, S., & Simon, P. (1955). Economic growth and income inequality. *American Economic Review*, 45(1), 1-28
- Lieb, C. (2004). The environmental Kuznets curve and flow versus stock pollution: The neglect of future damages, *Environmental and Resource Economics*, 29 (4) 483-506.
- Lim, J. (1997). The Effects of Economic Growth on Environmental Quality: Some Empirical Investigation for the Case of South Korea. *Seoul Journal of Economics*, 10 (3) 273-292.
- Jáuregui, C., González, H., Salazar, J. y Rodríguez, R. (2008), Free trade and pollution in the manufacturing industry in Mexico: A verification of the Inverse Kuznets Curve at a state level. En Cantú, F. y Durón, S., Eds. *Compendio de resúmenes del 38° Congreso de investigación y desarrollo del Tecnológico de Monterrey: Ecosistemas para el desarrollo emprendedor, económico y social*, p. 128.
- Lomborg, B. (2001). *The Sceptical Environmentalist*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lopez, R. (1994). The environment as a factor of production: the effects of economic growth and trade liberalization. *Journal of Environmental Economics and Management*, 27, (2): 163-184.
- Martinez, Zarzoso, Bengochea, & Morancho. (2004). Pooled mean group estimation of an environmental Kuznets curve for CO₂. *Economic Letters*, 82 (1), 121-126.
- Mazzanti, M., Montini, A., & Zoboli, R. (2007). Economic Dynamics, Emission Trends and the EKC Hypothesis New Evidence Using NAMEA and Provincial Panel Data for Italy. *Working Papers*, 24.
- McConnell, K. (1997). Income and the demand for environmental quality. *Environment and Development Economics*, 2 (4), 383-399.
- Millimet, D., List, J., & Stengos, G. (2003). The environmental Kuznets curve: Real

- progress or misspecified models? *Review of Economics and Statistics*, 85 (4), 1038-1048.
- Minliang, Z., Withagen, C. A., & Groot, H. L. (2001). Dynamics of China's Regional Development and Pollution: An Investigation into the Existence of an Environmental Kuznets Curve. *EAERE Conference*. Southampton, UK: <http://www.soton.ac.uk/~eaere=conf2001=conf2001.html>.
- Moomaw, W. R., & Unruh, G. C. (1997). Are Environmental Kuznets Curves Misleading Us? The Case of CO2 Emissions. *Environment and Development Economics*, 2 (1), 451-463.
- Ordás, C. C. (2007). Temporal and spatial homogeneity in air pollutants panel EKC estimations: Two nonparametric tests applied to Spanish provinces. *MPRA Paper*, 43.
- Perman, R., & Stern, D. (1999). The Environmental Kuznets Curve: Implications of Non-Stationarity. *Working Papers in Ecological Economics 9901*, Australian National University, Centre for Resource and Environmental Studies, Ecological Economics Program.
- Perman, R., & Stern, D. (2003). Evidence from panel unit root and cointegration tests that the Environmental Kuznets Curve does not exist. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 47 (3), 325-347.
- Perrings, C., & Ansuategi, A. (2000). Sustainability, Growth and Development. *Journal of Economic Studies*, 27 (1-2), 19-54.
- Pittel, Karen. (2006). A Kuznets Curve for Recycling. Economics Working Paper Series, *Center of Economic Research at ETH Zurich*, Working Paper 06/52.
- Roberts, J. T., & Grimes, P. E. (1997). Carbon Intensity and Economic Development 1962-1991: A Brief Exploration of the Environmental Kuznets Curve. *World Development*, 25 (2), 191-198.
- Roca, J., Padilla, E., Farre', M., & Galletto, V. (2001). Economic Growth and Atmospheric Pollution in Spain: Discussing the Environmental Kuznets Curve Hypothesis. *Ecological Economics*, 39 (1), 85-99.
- Schmalensee, R., Stoker, T. M., & Judson, R. A. (1998). World Carbon Dioxide Emissions: 1950-2050. *Review of Economics and Statistics*, 80 (1), 15-27.
- Shafik, N. (1994). Economic Development and Environmental Quality: An Econometric Analysis. *Oxford Economic Papers*, 46 (0), 757-773.
- Spangenberg, J. (2001). The environmental Kuznets curve: A Methodological Artefact?

Population and Environment, 23 (2), 175-191.

- Stern, D. (1998). Progress on the environmental Kuznets curve? *Environment and Development Economics*, 3(1), 173-196.
- Stern, D. I., & Common, M. S. (2001). Is There an Environmental Kuznets Curve for Sulfur? *Journal of Environmental Economics and Management*, 41(2), 162-178.
- Stern, D., & Common, M. S. (1996). Economic growth and environmental degradation: The environmental Kuznets curve and sustainable development. 24 (7), *World Development*, 1151-1160.
- Stokey, N. (1998). Are there limits to growth? *International Economic Review*, 39 (1), 1-31.
- Tobey, J. (1990). The effects of domestic environmental policies on patterns of world trade: an empirical test. *Kyklos*, 43 (2), 191-209.
- Verbeke, T. & De Clercq, M. (2004). The Environmental Kuznets Curve: some really disturbing Monte Carlo evidence, *Working Papers of Faculty of Economics and Business Administration, Ghent University, Belgium* 04/242.
- Wang, P., & Bohara, A. (1998). A risk-based environmental Kuznets curve for US hazardous waste sites. *Applied Economics Letters*, 5 (12), 761-763.