



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Estimación de las relaciones de la curva ambiental de Kuznets para Colombia

Diana Yineth Rivera Reyes

Directora:

Nancy Milena Hoyos Gómez

Trabajo para optar al título de Magister en Ciencias Económicas

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Económicas

Bogotá D.C

2020

Estimación de las relaciones de la curva ambiental de Kuznets para Colombia

Diana Yineth Rivera Reyes¹

RESUMEN

Diferentes estudios sugieren que la relación entre el ingreso económico y el deterioro ambiental tiende a ser positiva después de un tiempo. Esta tendencia se comprueba con la comúnmente llamada curva de Kuznets ambiental. Este documento busca mostrar una estimación de las relaciones existentes entre variables de deterioro ambiental como el Indicador de calidad del agua y la emisión de material particulado, el ingreso y otras variables macroeconómicas por medio de un modelo de datos panel con efectos fijos. En el desarrollo del documento se especifica que la relación directa entre el deterioro ambiental y el ingreso cumple con lo señalado en gran parte de la literatura, pero los resultados son volátiles y sensibles al incluir diferentes variables explicativas o cambiar su especificación.

Palabras clave: Deterioro ambiental, Ingreso, Curva Ambiental de Kuznets.

Clasificación JEL: E01, Q53

ABSTRACT

Different studies suggest that the relationship between income and environmental deterioration tends to be positive eventually. This tendency is proven by the commonly called Environmental Kuznets curve. This document seeks to show an estimate of the relationships between environmental degradation variables as the water quality indicator and emission of particulate material, income, and other macroeconomic variables using a panel data model with fixed effects. Throughout the development of this document, the direct relationship between environmental degradation and income is in accordance with the findings indicated in much of the literature, but the results are volatile and sensitive to included, or their specification is changed.

Keywords: Environmental deterioration, Income, Kuznets Environmental Curve.

JEL Classifications: E01, Q53

¹ Economista de la Universidad Nacional de Colombia, contacto dyriverar@unal.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El deterioro ambiental se ha convertido en un tema de actualidad en todo el mundo es uno de los principales problemas que enfrentan los humanos y que por el momento ha sido difícil de superar. Los científicos coinciden en que la vía por donde han ocurrido los principales cambios en el globo, como el calentamiento global, es a través de las actividades humanas y se preocupan por identificar las mejores políticas para reducir las diferentes emisiones. Un avance en la política es el Acuerdo de Paris, el cual va dirigido a fortalecer la respuesta a las amenazas del cambio climático (Olale, Ochuodho, Lantz, y Armali, 2018) y es por medio de diferentes teorías y análisis de datos que se validan ese tipo de políticas.

La hipótesis de la curva ambiental de Kuznets (CAK) permite visibilizar las relaciones entre las dinámicas económicas y ambientales. Esta curva plantea una hipótesis macroeconómica según la cual el aumento del deterioro ambiental está relacionado con el aumento en el ingreso medido por el Producto Interno Bruto. Es decir, existe un punto máximo a partir del cual el deterioro empieza a decaer mientras el ingreso sigue aumentando, para mostrar una curva en forma de “U” invertida. Dado lo anterior, el presente documento aborda las principales relaciones que existen entre el nivel de ingreso económico y el deterioro ambiental para Colombia basadas en la CAK.

El objetivo principal del documento es probar la relación existente entre variables indicadoras de deterioro ambiental y el ingreso económico medido como el producto interno bruto. Se realiza el ejercicio para Colombia durante el periodo comprendido entre el 2011 al 2017. Dado que son muchas las variables que se refieren al deterioro ambiental y no todas reflejan el estado general del medioambiente, se asume que los indicadores son variables proxy de este estado. Igualmente, se intenta establecer específicamente la relación entre dos variables indicadoras del deterioro ambiental: la primera es una medida de la calidad del agua y la segunda es la emisión de material particulado PM_{10}^2 .

La principal motivación de encontrar las relaciones mencionadas es la falta de preocupación por el medioambiente, junto con los pocos estudios realizados para Colombia específicamente. Actualmente, en el país se muestra un aumento de las emisiones de gases contaminantes, la

² El PM_{10} se define como aquellas partículas sólidas o líquidas de polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento o polen, dispersas en la atmósfera y cuyo diámetro es de 10 micras.

deforestación de la región amazónica y la contaminación de las fuentes hídricas, por nombrar algunos. Estos factores generan no solo problemas en el medioambiente sino en la salud de las personas, lo que hace importante tener clara las relaciones existentes entre el medioambiente y la economía de un país y ejemplificar de alguna manera la forma cómo se están dando las soluciones a este tipo de problemas ambientales.

Para modelar las relaciones sugeridas por la CAK, se emplea un modelo econométrico de datos panel con efectos fijos e información municipal. Como variables control se utilizan el valor agregado municipal como proxy del Producto Interno Bruto, la población y la Inversión Extranjera Directa del sector manufacturero. Sin embargo, es de anotar que la carencia de información municipal es una limitación importante. Las variables macroeconómicas suelen estar disponibles para el total nacional y no para desagregaciones departamentales o municipales. La falta de datos debido a que ese tipo de seguimientos estadísticos no se realizan con frecuencia en Colombia, restringe el grupo de variables control que pudieran incluirse en el modelo para explicar el deterioro ambiental.

El documento se divide en seis secciones. La primera sección corresponde a la introducción. La segunda parte presenta el marco teórico con la revisión de literatura. La tercera expone los hechos estilizados para Colombia. La cuarta sección se compone por el enfoque metodológico usado para abordar el problema. Seguidamente, se presentan los resultados de los modelos estimados y, por último, en la sexta sección, se exponen las principales conclusiones.

2. MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN DE LITERATURA

El cambio climático es definido por la Convención Marco de las Naciones Unidas como una variación del clima atribuida directa o indirectamente a la actividad humana, que se suma a la variabilidad natural del clima (la cual se refleja de manera lenta y no devastadora para los ecosistemas) (Naciones Unidas, 1992). Esta variación se visibiliza por medio de cambios meteorológicos en temperatura, presión y vientos; los cuales se reflejan, a su vez, en el aumento de la emisión de gases efecto invernadero³. Las causas de estos cambios es el consumo masivo de combustibles fósiles y el

³ Según las Naciones Unidas, los gases efecto invernadero se entienden como aquellos componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropógenos, que absorben y reemiten radiación infrarroja.

uso de la tierra para actividades productivas altamente contaminantes (FAO, 2006), lo que es derivado principalmente por la actividad humana y no por cambios naturales.

Estas actividades provocan un deterioro del medioambiente a través del agotamiento de recursos y la destrucción de ecosistemas o hábitats. Así pues, el deterioro ambiental se define como cualquier cambio o perturbación del medioambiente que se perciba como perjudicial o indeseable (Johnson, y otros, 1997). Desde finales del siglo XX, los diferentes climas extremos que el planeta ha padecido evidencian su relación con el calentamiento global que se ha convertido en un tema importante, tanto a los componentes locales (la polución) como los globales (la degradación de la capa de ozono) (Uchiyama, 2016).

Las variables que miden el deterioro ambiental a nivel mundial han presentado altos crecimientos históricos. Por ejemplo, la concentración de CO₂ en la atmósfera alcanzó un récord histórico en abril de 2018: en promedio, la concentración fue de 410,3 partes por millón, frente a 400 partes por millón para 2015 (Semana, 2019). Según anunció la Organización Meteorológica Mundial (OMM), esta cifra significa un aumento del 146% de los niveles de CO₂ presentados en la era preindustrial que se considera es antes de 1750 (OMM, 2019).

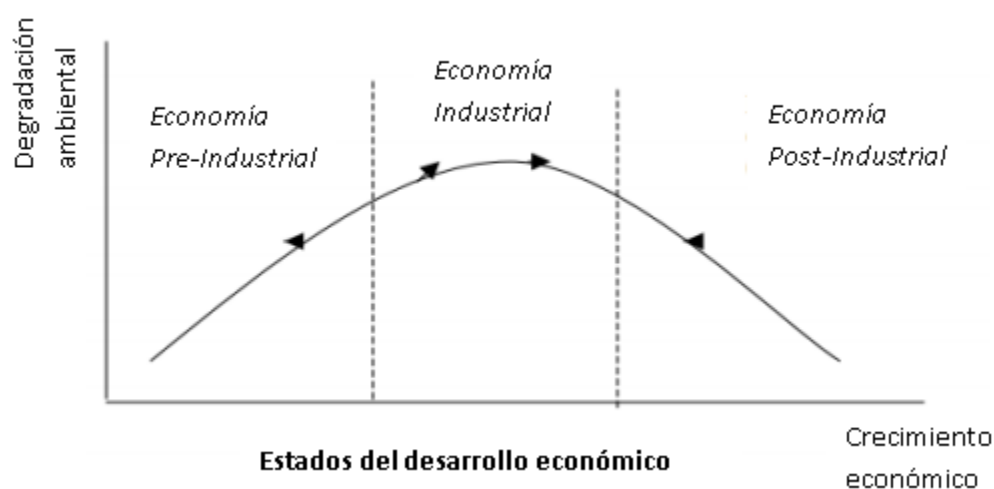
El deterioro ambiental, por tanto, puede ser atribuido a la combinación de la población creciente, al crecimiento económico o riqueza crecientes, junto al uso de tecnologías obsoletas que agotan o contaminan los recursos naturales. Así mismo, la literatura se ha enfocado principalmente en analizar la relación entre el deterioro ambiental y el ingreso económico, la cual es conocida como la hipótesis de la curva ambiental de Kuznets —por la semejanza que guarda con la curva original de Kuznets, la cual identifica la relación entre la distribución del ingreso y el ingreso per cápita—.

Dicha hipótesis sostiene que el nivel de deterioro ambiental, medido usualmente a través de las emisiones de ciertos gases contaminantes, está determinado por el nivel de ingreso de una economía medido por el Producto Interno Bruto (PIB). Además, de promover la producción económica de bienes y servicios sin tener conciencia de los daños medioambientales que estos puedan generar. Esta curva consta de tres etapas que en conjunto forman tradicionalmente una campana o —como también se llama en la literatura— “U” invertida (Gráfica 1).

En la primera etapa, llamada economía pre-industrial, se observa el dominio de la producción primaria y una abundancia de recursos naturales, aspectos característicos de países cuyo bajo

crecimiento económico suele generar un nivel de contaminación limitado. En la segunda etapa — propia de una economía industrial— se observa una relación positiva entre el ingreso y el deterioro ambiental. Es decir, una mayor producción industrial y, por tanto, un mayor ingreso provoca un deterioro de los recursos naturales de grandes proporciones (Panayotou, 2003). Por último, en la tercera etapa se observa una economía fuerte, basada en servicios y mejoras tecnológicas e informáticas que limitan la producción de contaminantes y reducen el deterioro ambiental. Esta etapa es llamada usualmente la etapa de economía Post-industrial.

Gráfica 1: Comportamiento de la curva ambiental



Fuente: Elaboración propia

Autores como Kaika y Zervas (2013) han encontrado diferentes resultados con respecto a la forma de campana de la curva ambiental de Kuznets. Para estos autores, al estar determinada en gran parte por el uso de diferentes variables de deterioro ambiental en el eje Y, la curva arroja como resultado diferentes formas de N o N invertida. Estudios que validan y corroboran la hipótesis de la curva, como el de Grossman y Krueger (1991), encuentran una relación entre las partículas suspendidas en el aire (PM_{10}), el dióxido de azufre (SO_2) y el humo negro, la densidad urbana y el ingreso per cápita. Sin embargo, la forma de la curva ambiental difiere dependiendo del tipo de contaminante considerado, siendo este en forma de “N” para la emisión de gases.

Por otro lado, Panayotou (1993) encontró la existencia de la curva ambiental con la variable tasa de deforestación. Selden y Song (1994) hallan la relación de campana o “U invertida” con diferentes

contaminantes como indicador (PM_{10} , SO_2 y CO), con la salvedad de que los puntos de inflexión de la curva son mayores para los países con niveles de menor ingreso. Dinda (2002), por su parte, encuentra que la emisión de dióxido de carbono (CO_2) está relacionada positivamente con el crecimiento económico en Norte América y Europa Occidental, Centro América y Suramérica, y Oceanía y Japón, lo que aporta evidencia del cumplimiento de la hipótesis en su primera etapa.

Pao y Tsai (2010) también encuentran una relación en forma de campana entre las emisiones de CO_2 y el crecimiento económico en los países del BRIC⁴, además de mostrar que existe un impacto positivo y estadísticamente significativo entre el consumo de energía y la contaminación. Por otro lado, otros autores como Shafik y Bandyopadhyay (1992) concluyen, con variables como la inversión, tarifas de electricidad, y comercio internacional, que es posible crecer económicamente sin contaminar el medioambiente. No obstante, aunque no existe un patrón específico de crecimiento económico e indicadores ambientales, sí existen unas relaciones.

En los estudios mencionados, diferentes variables han sido utilizadas como proxy del deterioro ambiental, las cuales pueden dividirse en tres grandes grupos: indicadores de calidad del aire, indicadores de calidad de agua y otros indicadores. Los indicadores del aire se componen principalmente por emisiones de dióxido de azufre (SO_2), partículas suspendidas (PM), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), y óxido nitroso (NO). Los indicadores del agua son esencialmente la concentración de patógenos en el agua como la cantidad de metales pesados, sólidos suspendidos, químicos tóxicos y el régimen de oxígeno. Finalmente, los otros indicadores se componen por ejemplo por índices de deforestación, cantidad de basuras, temperaturas, grado de erosión, entre otros, los cuales son más generales.

Por otra parte, algunos artículos como el de He y Richard (2010), con información de Canadá, concluyó que no se cumple la CAK para emisiones de CO_2 . Soytas, Sari, y T. Ewing (2007) también encontraron que no había existencia empírica de la curva. Estos resultados exponen la dificultad con los diferentes datos, metodologías y países a los que se aplica, además, controvierten los estudios empíricos publicados en revistas internacionales que evidencian menos consenso en la validez de la hipótesis de la curva (Yang, He, & Chen, 2015).

⁴ Países pertenecientes: Brasil, Rusia, India y China

En este sentido, dado los diferentes argumentos a favor de la existencia de la CAK, no hay razones de peso para suponer que la relación entre el ingreso y la calidad ambiental se verifique de modo automático, según Bimonte (2002). Por consiguiente, es importante no afirmar que el crecimiento económico es un sustituto perfecto de la política ambiental. Esto implica que existen otros factores que influyen en la calidad ambiental y que difieren notablemente no solo entre países con diferente grado de desarrollo, sino inclusive entre países con niveles de ingreso similares (Zilio, 2012).

Con respecto a variables control, se han considerado diferentes indicadores macroeconómicos tales como inversión extranjera directa, densidad poblacional, comercio internacional, variables energéticas (precios, consumo, energías renovables), desigualdad económica, calidad institucional, asimetría de poder, urbanización y avance tecnológico, entre las principales. Por ejemplo, Abdouli, Kamoun y Hamdi (2018) incluyen en un modelo —además del CO₂ y PIB per cápita— las variables de Inversión Extranjera Directa (IED), consumo de energía per cápita y densidad poblacional. Estas variables control se pueden dividir en grandes grupos como:

A. Comercio Internacional

Autores como Cole (2004) han señalado que la apertura económica impulsa la expansión de la economía a través de una mayor producción de bienes con fin exportador; lo cual puede generar una mayor contaminación ya que la mayoría de las exportaciones provienen del sector industrial que a su vez consumen mayor cantidad de energía en los procesos productivos. Por ejemplo, para el caso colombiano, la industria manufacturera y la minería son las dos actividades económicas con los más altos consumos energéticos con una participación en el consumo total de energía de más del 60% para el año 2017, según el DANE en la Cuenta Satélite de Energía (DANE, 2019). Además, las exportaciones minero-energéticas y de la industria manufacturera en ese mismo año tuvieron participaciones del 55,7% y 20,3% del total de las exportaciones.

Adicionalmente, el comercio internacional puede generar un cambio o traslado de la producción doméstica. Es decir, contaminación que se emitía en países desarrollados se traslada a otros países con ingresos bajos, los cuales cuentan con regulaciones ambientales mucho más flexibles y son capaces de replicar esa producción. Para Dinda S. (2004) esta hipótesis se llama “Paraiso de la contaminación” y sugiere que los países desarrollados, donde la regulación ambiental es más estricta, traslada la mayor parte de sus industrias. No obstante, existe la posibilidad de que por medio de la IED se introduzca tecnología que puede ayudar a reducir la contaminación, por lo que

todas las transferencias, en especial de maquinaria y equipo avanzado, no son en pro de la contaminación.

B. Energía y avance tecnológico

Otra de las variables que se adiciona en las estimaciones de CAK es la intensidad energética. La inserción de esta variable se debe al alto consumo de energía requerido en actividades industriales y mineras. Diferentes estudios encuentran una relación positiva y significativa entre las emisiones de CO₂, la energía y el crecimiento del ingreso —esta relación se cumple principalmente cuando los países son intensivos en energía primaria o fósil como insumo para producir en la actividad— además, indican que los efectos junto con el nivel de desarrollo influyen sobre los resultados de la presencia y tamaño del punto de inflexión de la curva ambiental (Richmond y Kaufmann, 2006).

De las variables de IED y energía también surge la idea de incluir la variable de avance tecnológico, ya que los países desarrollados innovan continuamente, no solo para crecer sino para lograr mantener su ingreso real. Por lo que se entiende que las emisiones se pueden disminuir con el tiempo probablemente por los cambios tecnológicos en pro del medioambiente. Por tanto, en el corto plazo la curva ambiental puede mostrar un ciclo de difusión de la externalidad de la generación de nueva tecnología (Kaika y Zervas, 2013) que lleva a una mayor eficiencia en el uso de energía y materiales.

Asimismo, a medida que aumentan los ingresos per cápita, las personas prefieren utilizar una tecnología más eficiente que proporcione un medioambiente más limpio, lo cual incrementa la demanda de avances tecnológicos, como lo muestra Komen, Gerking y Folmer (1997), quienes encuentran una relación positiva entre el ingreso y los fondos de investigación y desarrollo (variable que se usó como proxy de avance tecnológico). También Catalán (2014) menciona cómo el deterioro ambiental es un subproducto de la actividad económica y se descompone en un efecto en el crecimiento de la economía, un efecto en la estructura económica y un efecto en la tecnología, que aumentan la eficiencia en el uso de la energía y generan menores niveles contaminantes.

C. Calidad institucional

Por otro lado, cuando una economía crece, generalmente el gobierno responde de manera adecuada a la conciencia ambiental, imponiendo regulaciones más estrictas. En este sentido, la normatividad puede convertirse en un factor crucial para la disminución de los niveles de

contaminación. En la práctica, sin embargo, es difícil evaluar con precisión la efectividad de la gobernanza de un país o, en general, de las instituciones políticas (Kaika y Zervas, 2013). Dutt (2009) estima la CAK en algunos países desarrollados, que se caracterizan por una mejor gobernanza ambiental, mejores condiciones socioeconómicas y mayor inversión en educación, y encuentra una relación inversión entre dichas variables y el deterioro ambiental.

Según se mencionaba en la parte inicial, la curva original de Kuznets trata de la relación entre ingreso económico y distribución del ingreso, y supone que el proceso de crecimiento puede conducir a una distribución del ingreso más equitativa que mejore la posición relativa del agente. Por lo que autores usan la variable de distribución del ingreso al momento de evaluar el patrón de la curva ambiental, como Tomas y Boyce (1998), quienes mencionan que la contaminación disminuye dependiendo de la brecha de poder adquisitivo entre aquellos que soportan la carga de la contaminación contra los que se benefician de la misma.

D. Población

Finalmente, existe un fenómeno llamado urbanización que ocurre normalmente por la alta migración de personas de las zonas rurales a las zonas urbanas e incide en los niveles crecientes de contaminación. Esto debido a que una mayor densidad poblacional se asocia con incrementos en el consumo de energía, en la demanda de productos industriales, de medios de transporte, entre otros. Véase, por ejemplo, Cui, Xia y Hao (2019), quienes encuentran un efecto de la urbanización significativo y positivo en la estimación de la curva ambiental de Kuznets.

Un impacto visible que puede tener en cuenta el aumento de la población es la huella ecológica⁵⁵. Como mencionan Ansari, Haider, & Khan (2020), es notablemente más alta en países con mayor crecimiento poblacional, mayor gasto de consumo y disminución en la productividad de recursos ecológicos. Un caso es el de la región de Asia occidental donde la huella creció por habitante de 1961 a 2016 en un 126% y el crecimiento poblacional fue de 146%.

La evidencia empírica mencionada, aunque utiliza diferentes variables explicativas para estimar la CAK, comparte características similares en la metodología y la forma funcional empleada. La

⁵⁵ La huella ecológica mide 6 componentes (tierra forestal, tierra urbanizada, pastoreo, cultivo, caladeros y huella de carbono) y se puede describir como una presión de la actividad humana sobre la naturaleza según Bartelmus (2008)

ecuación 1 presenta el modelo que describe la relación entre el deterioro ambiental y el ingreso, junto con las variables control como la inversión, la tecnología, la población, la política, entre otras.

$$CAK_{it} = Y_{it} = \alpha + \beta_1 X_{it} + \beta_2 X_{it}^2 + \beta_3 X_{it}^3 + \beta_4 Z_{it} + \varepsilon_{it} , \quad (1)$$

Donde Y_{it} es el indicador ambiental; X_{it} es el ingreso; Z_{it} son otras variables que influyen sobre el deterioro ambiental; t el tiempo; i los individuos; α la constante, y $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ son coeficientes que explican cada una de las variables (Kaika y Zervas, 2013). Dada la estructura anterior, se generalizan las siguientes relaciones encontradas en la revisión de literatura:

- (i) $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$. Un patrón plano o no hay relación entre X y Y.
- (ii) $\beta_1 > 0$ y $\beta_2 = \beta_3 = 0$. Una relación monótona creciente o relación lineal entre X y Y.
- (iii) $\beta_1 < 0$ y $\beta_2 = \beta_3 = 0$. Una relación monótona decreciente o relación entre X y Y.
- (iv) $\beta_1 > 0, \beta_2 < 0$ y $\beta_3 = 0$, relación de “U” invertida como lo menciona la hipótesis de la curva.
- (v) $\beta_1 < 0, \beta_2 > 0$ y $\beta_3 = 0$, una relación de “U”.
- (vi) $\beta_1 > 0, \beta_2 < 0$ y $\beta_3 > 0$, la relación muestra una “N”.
- (vii) $\beta_1 < 0, \beta_2 > 0$ y $\beta_3 > 0$, muestra una relación de “N” invertida.

Los estudios que tratan sobre la comprobación de la CAK en su mayoría utilizan datos panel para un grupo de países o una serie temporal para un único país, como diferentes métodos econométricos tales como panel estático o dinámico con efectos fijos, cointegrados, ARDL⁶, VAR⁷ y VEC⁸. Estas metodologías han recibido algunas críticas como las señaladas por Dinda (2002), quien menciona que los métodos pueden tener dificultades por las amplias variaciones que se presentan entre los países, en los aspectos económicos, y factores políticos y biofísicos que pueden afectar de manera adicional la calidad ambiental. Además, las limitaciones también se encuentran en la dificultad de manejar rangos de tiempo muy cortos, o no contar con la disponibilidad de datos sobre la calidad ambiental.

Trabajos realizados para América Latina como el de Sapkota y Bastola (2017) —quienes estudian los efectos de la Inversión Extranjera Directa (IED) y los ingresos sobre las emisiones contaminantes— usan series temporales de 1980 a 2010 para 14 países latinoamericanos. Por medio de modelos de

⁶ Auto-regressive Distributed Lag models

⁷ Vectores Autorregresivos

⁸ Vector de Corrección de Error

datos panel de efectos fijos y aleatorios, los autores concluyen que con el tiempo las industrias limpias y energéticamente eficientes mejoran la calidad ambiental a la vez que mejoran el crecimiento económico. Sapkota y Bastola incluyen variables control como el capital físico, energía, capital humano y densidad poblacional. Al-mulali, Tang, y Ozturk (2015), mediante el análisis de datos panel, encuentran que para Latinoamérica y el Caribe existe la curva en forma de “U” invertida entre las emisiones y el crecimiento económico.

Por su parte, López, Nieto, Ramos y Golpe (2015) exponen cómo en Venezuela los cambios en las fuerzas impulsoras de la economía afectan las emisiones de CO₂ en el periodo 1980 a 2025, por medio de técnicas de cointegración para así probar el cumplimiento de la curva ambiental. Además, mediante diferentes escenarios económicos para las proyecciones, los autores concluyen que la estabilización en el mediano plazo se logra combinando el crecimiento económico con el aumento del uso de energías renovables en el sector productivo.

Para Perú, Monserrate, Zambrano, Penafie, Monserrate y Ruano (2018), mediante la metodología de ARDL y VECM analizan la relación de cointegración entre el PIB, las emisiones de dióxido de carbono por consumo de energía, la energía eléctrica total renovable, el consumo de gas natural y el consumo de petróleo, todos en términos per cápita durante 1980 a 2011. La conclusión del artículo es que no existe la relación de “U” invertida en la curva, pero recomienda diseñar urgentemente políticas ambientales, y utilizar fuentes de energía alternativas.

Para el caso de Ecuador, Pontarollo y Muñoz (2019) realizan un estudio utilizando un enfoque de comparación bayesiano aplicado a un panel espacial para analizar la existencia de la curva ambiental invertida con datos desde 2007 a 2015 para 221 cantones en Ecuador. Para la investigación se utiliza un indicador de permisos de construcción y población como variables explicativas de consumo de la tierra. El estudio no encuentra evidencia de la CAK invertida; por el contrario, su curvatura es convexa, lo que significa que, a mayores niveles de consumo de la tierra, mayores son los niveles de riqueza.

Dados los estudios anteriores, también es relevante tener en cuenta que, para los países en desarrollo se ha encontrado que hay temas diferenciales que afectan directamente en las estimaciones. Por ejemplo, se ve cómo las áreas protegidas compiten permanentemente con la agricultura, la ganadería e incluso la industria. Así mismo, el gasto público en estos países con mayor pobreza se destina a ser un gasto social de vivienda, salud y educación o bien a infraestructura y

otras actividades que actúan como sostén del proceso de crecimiento. También las preferencias sociales de los países en desarrollo se relacionan claramente con la riqueza y la mala distribución del ingreso. Estas preferencias afectan de forma directa la demanda de calidad ambiental ya que una distribución desigual eleva la demanda de bienes inferiores⁹, sumado a las deficiencias de información sobre los daños ambientales (Zilio, 2012).

3. HECHOS ESTILIZADOS PARA COLOMBIA

Colombia es un país privilegiado geográficamente. La salida a dos mares, el Pacífico y Atlántico, y estar ubicado sobre la línea del Ecuador, le otorga al país una variedad de climas, pisos térmicos y especies que lo convierten en el segundo país más megadiverso del mundo (Colciencias, 2019). Aunque no es un gran emisor de gases efecto invernadero, gracias a la producción de energía eléctrica principalmente por fuentes renovables, el gobierno ha tomado medidas para proteger el medioambiente. La Política Nacional de Cambio Climático, la creación del impuesto al carbono y la adherencia a diferentes acuerdos internacionales son algunas de las disposiciones adelantadas.

Actualmente, el país ocupa el puesto 42 de 180 en el ranking de cuidado al medioambiente¹⁰. El gasto en protección ambiental se incrementó de 225.000 millones de pesos en el año 2005 a 504.000 millones en el 2018, según las cifras de la CEPAL¹¹. Sin embargo, los datos de deterioro ambiental en Colombia son preocupantes. Por ejemplo, las altas temperaturas, que según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) han pasado de 374km², aproximadamente desde los siglos XVII-XIX a ser 32km² en el 2017, han provocado una pérdida de 92% del área glaciar de los nevados.

Adicionalmente, se observa cómo la cobertura de bosque en el país ha pasado por diferentes momentos a través de los años. Se estima que el país disminuyó su superficie de bosque de forma gradual pasando de 56,4% en 1990 a 51,6% en 2014. No obstante, a pesar de que en los últimos años el crecimiento de la superficie cubierta por bosque ha mejorado, los reportes del IDEAM han mostrado que la tala de bosque no se detiene, especialmente en la región amazónica. También en el indicador de *Global Footprint Network* muestra que Colombia tenía en el 2012 una huella

⁹ Un bien inferior es aquel cuya demanda disminuye cuando los ingresos aumentan.

¹⁰ Índice de desempeño ambiental elaborado por la Universidad de Yale 2018

¹¹ Comisión Económica para América Latina y el Caribe

ecológica de 1,91 hectáreas por persona, cifra que lentamente ha aumentado ya que en el 2016 fue de 2,05.

La cuenta ambiental y económica de flujos de agua, la cual contabiliza la extracción, uso y vertimiento de agua por actividad económica y por sector institucional de los hogares, muestra cómo en el 2017 —comparado con el 2016— las aguas residuales aumentaron en 0,2% y la producción de agua de reutilización disminuyó en 4,4%, pasando de 1.007,4 a 963,5 hectómetros cúbicos. Las principales actividades económicas generadoras de aguas residuales son las industriales, como las azucareras, paneleras y metalúrgicas, y los fabricantes de papel, cartón y sus derivados. Adicionalmente, los hogares son los mayores contribuyentes de aguas residuales con un aporte del 60,4% en el 2017, según los Cuadros Oferta Utilización en unidades físicas de la cuenta ambiental del agua (DANE, 2020).

En la cuenta satélite de flujo de materiales se observa cómo la emisión de gases efecto invernadero (GEI) se genera principalmente en los sectores de la industria manufacturera. La industria participa con el 61,2% y el comercio al por mayor y al por menor con el 12,4% (en este sector está incluido el transporte que es lo que más pesa dentro de la actividad en la generación de GEI), los cuales crecieron en 22,1% y 1,8% en el año 2017, respectivamente (DANE, 2020). Estos gases son generados principalmente por la quema de carbono, la cual es producida por incendios forestales o combustión industrial, emisiones de vehículos a gasolina y diésel, entre otros.

Colombia es un país con mucha diversidad económica, geográfica y de ecosistemas. Actualmente, cuenta con un alto índice de desigualdad de los ingresos con un coeficiente de Gini de 0,517 para el 2018 según el DANE, algo que comparte con los demás países latinoamericanos que poseen coeficientes altos también. Existe diversidad de territorios ya que existen regiones con diferentes tipos de relieves y a su vez con diferentes ecosistemas, fuentes hídricas, climas, entre otros, lo que hace que el trato que se da al medioambiente puede ser diferenciado como en el caso de los resguardos indígenas versus una ciudad principal. Esto se torna relevante ya que son temas que influyen sobre el crecimiento del país pero que no es fácilmente identificable como en el caso de variables institucionales regionales, la ilegalidad y la corrupción.

En la literatura se encuentra algunos estudios realizados para Colombia. El primero de Correa, Vasco y Montoya (2005) muestra que el país se encuentra en la fase creciente de la curva. Los autores analizan el periodo 1975 a 1997 y consideran diferentes contaminantes y variables explicativas

como la distribución del ingreso, densidad poblacional y derechos civiles y libertades políticas. El segundo estudio de Pinzón y González (2018) evalúa la validez de la hipótesis de la curva ambiental para el periodo 1971 a 2014, por medio de un modelo VEC y una variable adicional de consumo de energía. Además, presenta la evidencia empírica de existencia de la curva para Colombia en su fase creciente, donde incrementos del PIB se asocian con incrementos de las emisiones de CO₂.

4. DISEÑO METODOLÓGICO

En este documento se utilizan dos indicadores ambientales como variable dependiente: la calidad del agua ICA (LogICA) y la emisión de material particulado PM₁₀ (LogAIRE), ambos obtenidos de las bases de datos del IDEAM. Como variables explicativas se utilizan el índice de importancia económica municipal (LogPIB), la población municipal (LogPOB), y la producción industrial (LogPRO), todos provenientes del DANE. A las variables se les aplica una transformación logarítmica dado que esta reduce la escala para mejorar la visibilidad gráfica y la distribución de los datos, excepto la variable control de producción industrial altamente contaminante para evitar pérdida de información. La periodicidad es anual y el periodo analizado comprende los años 2011 a 2017. El ejercicio para el caso de la calidad del agua consta de 87 individuos y 4 periodos temporales, mientras que para el caso del aire se tienen 51 individuos y 7 años.

Se utiliza un modelo de datos panel con efectos fijos, los cuales permiten la eliminación de factores no observables constantes en el tiempo, como por ejemplo el avance tecnológico, el cual podría asumirse que no varía mucho en el periodo de tiempo analizado. La ecuación 2 presenta el modelo, donde se incluye una tendencia temporal (TEND) para tener en cuenta la tendencia observada en algunas de las variables.

$$\begin{aligned} \text{Log}Y_{it} = & \alpha + \beta_1 \text{LogPIB}_{it} + \beta_2 \text{LogPIB}_{it}^2 + \beta_3 \text{LogPIB}_{it}^3 + \beta_4 \text{LogPOB}_{it} + \beta_5 \text{LogPRO}_{jt} \\ & + \beta_6 \text{TEND}_{it} + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (2)$$

Donde *i* es el identificador para cada punto de monitoreo ubicados en diferentes municipios y *j* es el identificador de los departamentos donde se ubican estos mismos puntos, dado que la información a nivel municipal para la producción industrial no está disponible en el DANE.

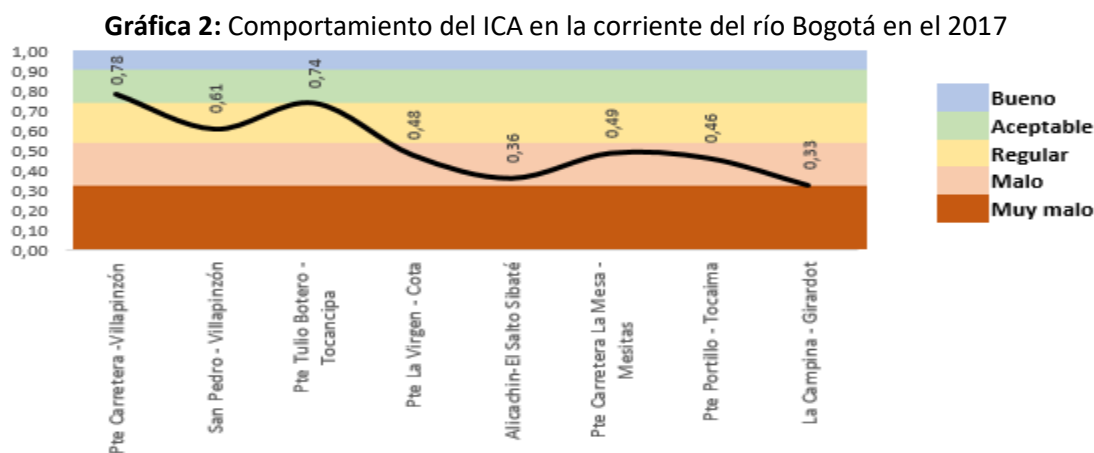
DESCRIPCIÓN DE VARIABLES

Variables indicadoras de deterioro ambiental

Desde hace pocos años, existe un seguimiento a variables ambientales para Colombia; por tanto, los indicadores disponibles tienen poca información. Sin embargo, se destaca la medición continua que realiza el IDEAM a diferentes elementos del medioambiente, como el material particulado de aire (PM₁₀), la calidad del agua (ICA), la superficie de bosque, los ecosistemas, entre otros. Dado lo anterior, se decidió incluir los dos indicadores de aire y agua principalmente por el tiempo de seguimiento y reporte de la información y su variabilidad de puntos de monitoreo en el país. Es necesario mencionar que las actualizaciones de información tienen un rezago de uno o dos años aproximadamente en varios indicadores.

- *Índice de calidad del agua promedio (ICA):*

Las principales corrientes hídricas a las que se le hace seguimiento son el río Bogotá, el río Cauca y el río Magdalena, aunque en todo el territorio nacional se encuentran 192 puntos de monitoreo que incluyen ríos del área Caribe, Pacífico, Amazonas y Orinoquía. En la Gráfica 2 se puede observar el registro de los 8 puntos de monitoreo de la corriente del río Bogotá. El valor registrado en los puntos de inicio de la corriente tiene un valor más alto del indicador que aquellos que se registran al final del tramo. Entre más alto es el índice, mejor es la calidad del agua: es decir, está menos contaminada. Para la mayoría de las fuentes hídricas se observan rangos de malos y muy malo, y son muy pocos los puntos de monitoreo que se encuentran en un rango regular, aceptable y bueno.



Fuente: Índice de Calidad del Agua – IDEAM. Elaboración propia

El valor numérico que califica la calidad de agua de una corriente superficial se basa en las mediciones obtenidas para un conjunto de cinco variables básicas (oxígeno disuelto, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno, conductividad eléctrica y PH). El ICA promedio corresponde al promedio aritmético de los valores del ICA calculados para una estación en un año. En este trabajo solo se usa la serie de 2011 a 2017 debido a que la información para la variable del índice de importancia económica está disponible a partir del 2011. Dado que no existen registros de la calidad del agua en algunos puntos de monitoreo para ciertos años, las observaciones temporales se agrupan de forma bianual para evitar pérdida de información. Se calcula un promedio para ambos años y se utiliza la información de alguno de los dos años en caso contrario.

- *Material particulado (PM₁₀):*

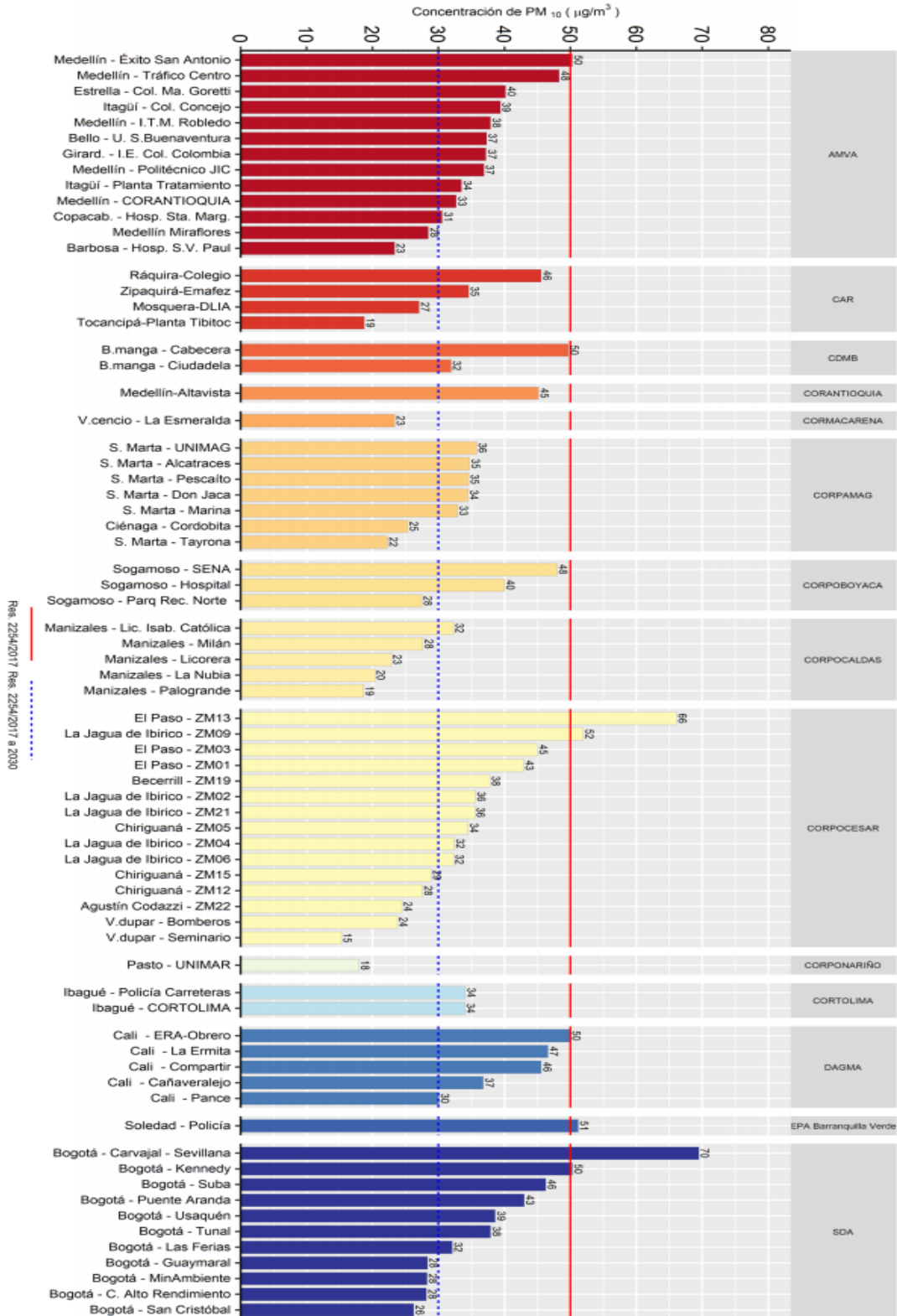
Estas partículas tienen varias formas y tamaños y se emiten no solo a partir de fuentes naturales sino también de varias fuentes fijas o móviles. En este caso, el PM₁₀ se emite directamente desde fuentes o se genera indirectamente a partir de gases tales como SO (Óxidos de azufre) y NO (Óxidos nitrosos). Esta es una variable determinante al momento de describir el deterioro ambiental ya que el material particulado puede alterar el metabolismo de las plantas, las cuales proveen oxígeno, y ocasionar enfermedades respiratorias en los seres vivos.

Según el último informe realizado por el IDEAM sobre la calidad de aire en el 2018¹², se observa cómo algunas estaciones de monitoreo aun superan los límites máximos establecidos en las resoluciones 610/2010 y 2254/2017, las cuales otorgan un tope de emisión de PM₁₀ no mayor a 50 µg/m³. Para Colombia aún existen 4 estaciones que se salen del tope, como se puede ver en el Gráfica 3, además, se resalta que las cifras han mostrado una leve disminución a través del tiempo ya que en el 2017 fueron 7 las estaciones que no cumplían con el límite.

La información utilizada en este documento para la estimación consta de 51 individuos (puntos de monitoreo) ubicados en 11 departamentos de Colombia, los cuales poseen datos anuales desde 2011 al 2017, y fue proporcionada por el sistema SISAIRE “Subsistema de Información Sobre la Calidad del Aire”, el cual es administrado por el IDEAM. Valores más altos del indicador significan niveles más altos de contaminación.

¹² Este informe estuvo disponible al público en las primeras semanas de enero de 2020.

Gráfica 3: Concentraciones promedio anuales de Partículas menores a 10 micras en 2018



Fuente: Informe de Estado de Calidad del Aire 2018 – IDEAM

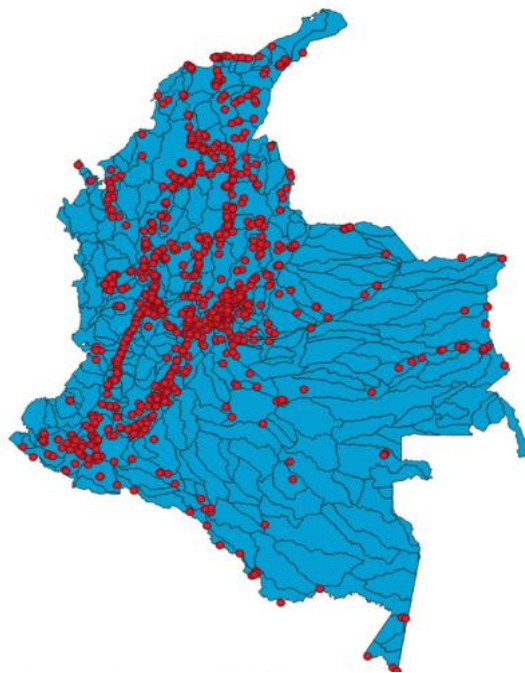
VARIABLES EXPLICATIVAS

La información macroeconómica disponible para Colombia es amplia. Sin embargo no se encuentra desagregada a nivel departamental o municipal, lo cual redujo la serie de datos del ejercicio inicialmente planteado con la información ambiental disponible. Las variables explicativas utilizadas se describen a continuación.

- *Indicador de importancia económica municipal (PIB):*

Mide la actividad productiva de los diferentes departamentos del país, además establece su comportamiento, evolución y estructura económica para el análisis y la toma de decisiones regionales (DANE, 2019). Esta variable se construye sobre el valor agregado del total nacional de las cuentas nacionales, por lo que se puede considerar como una variable proxy del PIB. La información se encuentra disponible desde el 2011 al 2017 de manera provisional para los 1.103 municipios, 8 distritos especiales, mas 18 áreas no municipalizadas, junto con la isla de San Andrés, para un total de 1.122 entidades administrativas locales. La Gráfica 4 permite observar la ubicación municipal de los puntos de monitoreo del agua. La información disponible a precios corrientes fue transformada a precios constantes con el Índice de Precios al Consumidor (IPC) anual.

Gráfica 4: Municipios donde se ubican los diferentes puntos de monitoreo del agua

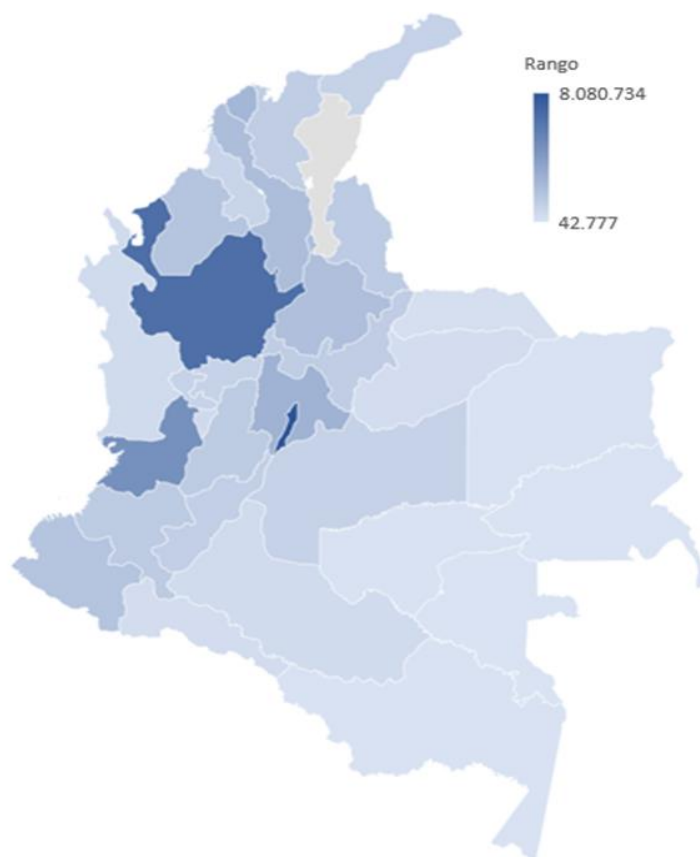


Fuente: IDEAM – Georreferenciación de puntos de monitoreo

Población (POB):

Según el DANE, la población en Colombia se calcula con base en las proyecciones del Censo General 2005 y se tiene información a nivel de municipio año por año hasta el 2020. Esta es una cifra que puede ser sujeta de actualización con los nuevos datos del Censo 2018, pero aún no se generan las proyecciones de largo plazo ni la retropolación con este nuevo censo. La Gráfica 6 muestra la concentración de la población en la región Andina.

Gráfica 6: Población Colombiana por departamento 2017 (Número de personas)



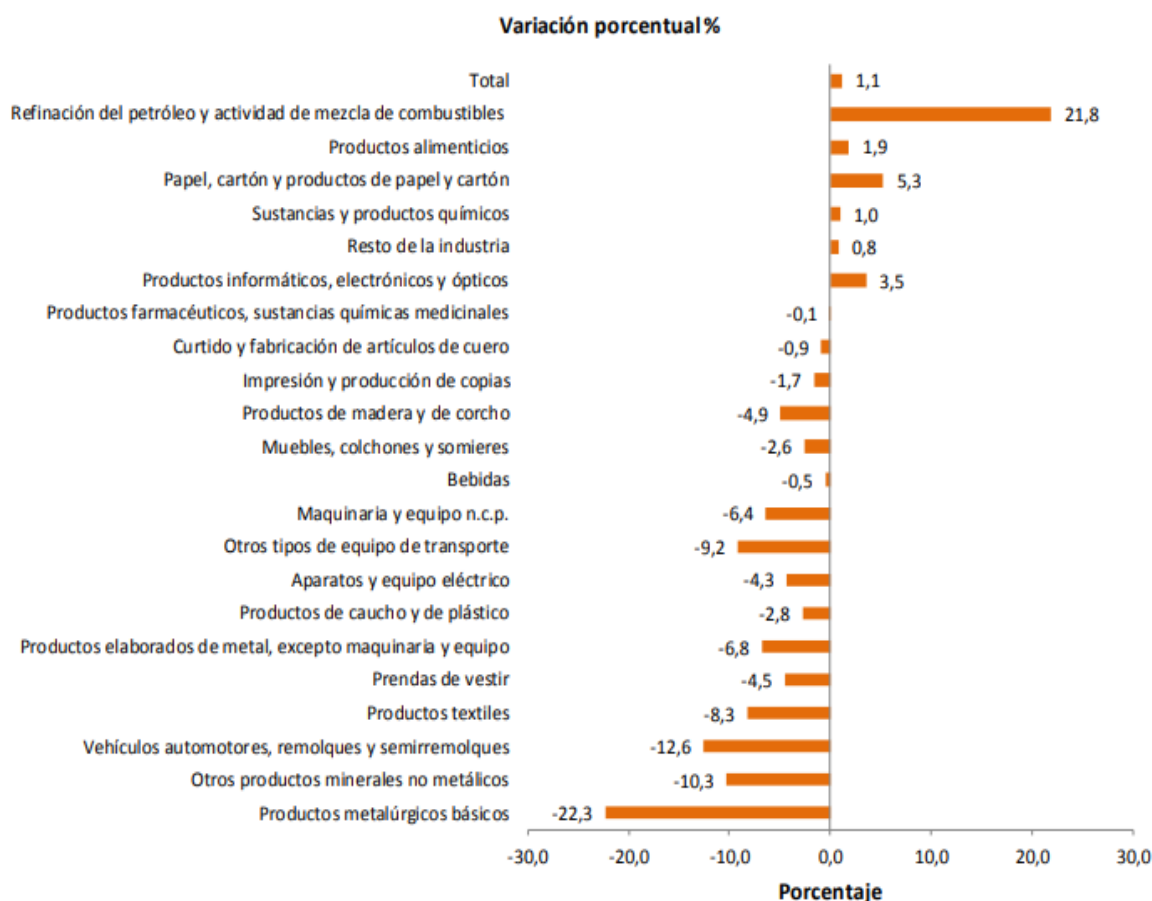
Fuente: DANE Proyecciones Censo 2005 - Elaboración propia

La población es una variable relevante para este trabajo dado que una mayor densidad poblacional se asocia con una mayor carga contaminante. Es decir, una cifra más alta de basuras, aguas residuales y número de vehículos, acciones que son contaminantes y propician a que la calidad del agua sea peor o que se emitan más gases efecto invernadero.

Producción industrial altamente contaminante (PROC) y Producción industrial total (PROT):

La información se tomó de la Encuesta Anual Manufacturera (EAM). Esta encuesta discrimina las principales industrias contaminantes según la generación de aguas residuales y emisiones de gases efecto invernadero, industrias que se toman a partir de las Cuentas Satélites¹³, las cuales pueden ser consultadas en el Anexo 1. Para la estimación también se tuvo en cuenta como variable control la producción bruta total del sector industrial— que, como se observa en la Gráfica 7, en el 2017 tuvo un crecimiento de 1,1%— para establecer cuál de las dos variables tiene mayor relevancia. En ambos casos, se obtiene la producción a precios corrientes para los diferentes departamentos, y se transforman a precios constantes por medio del IPC anual.

Gráfica 7: Variación anual de la producción bruta según divisiones industriales CIU 4 A.C (Total Nacional) 2017/2016



Fuente: DANE - Boletín EAM 2017

¹³ Cuadros Oferta – Utilización de la Cuenta Satélite Ambiental de flujos del agua

ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS DE PANELES

La Tabla 1 muestra las estadísticas descriptivas de las variables utilizadas en el panel de calidad del agua. El logaritmo del índice de calidad del agua alcanza un valor máximo de -0,06, los cuales suelen ser de los municipios ubicados en los departamentos de Nariño y Vichada, y un valor mínimo, el cual se concentra en municipios de Cundinamarca y Boyacá. Con respecto al logaritmo del Indicador de importancia económica se encuentra que, aunque los municipios son muy heterogéneos, la desviación estándar es de 1,41. De modo similar, la variable del logaritmo de la población es de 1,28.

Lo contrario ocurre con las variables de Logaritmo de la producción industrial total, ya que su dispersión es más alta con una desviación estándar de 2,78. Finalmente la variable de la producción industrial altamente contaminante muestra valores altos, pero es por la unidad de medida ya que es la única variable que se trabaja en niveles para evitar la pérdida de información. Este tratamiento en nivel se realizó dado que existen departamentos como Nariño que tenía presencia de algunas de las industrias contaminantes y después su valor fue cero debido al traslado o cierre de establecimientos.

Tabla 1: Estadísticas descriptivas panel de calidad del agua

Variable	Obs	Media	Desv. Estándar	Mínimo	Máximo	Signo esperado
LogICA	348	-0,53	0,27	-1,91	-0,06	
LogPIB1	348	5,94	1,41	3,03	8,92	(-)
LogPIB2	348	37,25	17,87	9,19	79,61	(+)
LogPIB3	348	246,19	177,79	27,85	710,30	(-/+)
LogPOB	348	10,34	1,28	7,93	13,40	(-)
LogPROT	348	21,39	2,78	11,47	24,90	(-)
PROC	348	4,04e+09	5,59e+09	0	2,18e+10	(-)

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, en la Tabla 2 se observan las estadísticas del panel con variable dependiente de emisiones de PM₁₀. El logaritmo de las emisiones al aire tiene un valor máximo de 4,7, el cual se identifica con municipios como Bogotá y Ráquira, y un mínimo de 2,8 donde se pueden ubicar municipios del departamento de Nariño. Para el caso de las variables de logaritmo de importancia municipal y el logaritmo de la población, se distingue una alta heterogeneidad entre los individuos con medias de 8,35 y 11,66 respectivamente.

Con respecto a las variables industriales, se encuentra que el logaritmo de la producción total es heterogéneo, y como se explicó en el panel anterior muestra un mínimo de cero porque la producción en algunos departamentos dejó de existir esa producción a través del tiempo.

Tabla 2: Estadísticas descriptivas panel de emisión de PM₁₀

Variable	Obs	Media	Desv. Estándar	Mínimo	Máximo	Signo esperado
LogAIRE	357	3,72	0,31	2,80	4,70	
LogPIB1	357	8,35	2,29	3,76	12,16	(+)
LogPIB2	357	74,91	40,86	14,16	147,83	(-)
LogPIB3	357	717,81	576,79	53,30	1797,35	(-/ +)
LogPOB	357	11,66	1,73	8,77	15,90	(+)
LogPROT	357	21,75	3,00	14,36	24,90	(+)
PROC	357	5,50e+09	6,31e+09	0	2,14e+10	(+)

Fuente: Elaboración propia

Por último, es conveniente mencionar que en el Anexo 2 se puede observar la tabla de correlaciones entre las variables de los dos paneles y en el Anexo 3, las gráficas de dispersión por cada año para ambos casos.

5. RESULTADOS

Inicialmente, se realizaron las pruebas de multicolinealidad, heterocedasticidad y correlación serial. Sin embargo, al obtener resultados, se evidenció la presencia de un problema de heterocedasticidad en ambos paneles que tuvo que ser corregida con la aplicación de errores estándar con clúster por cada uno de los individuos. Posteriormente se procedió a estimar. También se obtuvo en los dos paneles problemas de multicolinealidad que era de esperarse al utilizar la misma variable de diferentes potencias. El resumen de los resultados de las estimaciones de datos panel con efectos fijos de la variable dependiente de calidad del agua se puede observar en la Tabla 3.

Al obtener los resultados de las regresiones, se observó que los signos de los coeficientes de la variable de LogPIB fueron acordes con lo que se esperaba para todos los modelos. Este signo podría respaldar la hipótesis de la CAK para este indicador de deterioro ambiental con respecto a la relación que indica que entre más alto sea el nivel de ingreso mayor será el grado de contaminación del agua, representado con una disminución del índice.

Tabla 3: Resultados de la regresión para panel de calidad del agua

Variable dependiente: Logaritmo del Incador de Calidad del Agua							
Regresoras		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Logaritmo del Indicador Importancia Económica municipal (LogPIB1)	ee	-0,466 (0,306)	-0,561 (0,306)	-0,407 (0,303)	-0,502 (0,300)	-0,430 (0,306)	-0,519 (0,305)
	p	(0,131)	(0,070)	(0,182)	(0,098)	(0,164)	(0,092)
Logaritmo del Indicador Importancia Económica municipal al cuadrado (LogPIB2)	ee	0,041 (0,027)	0,051 (0,027)	0,038 (0,027)	0,048 (0,027)	0,038 (0,027)	0,048 (0,027)
	p	(0,138)	(0,069)	(0,166)	(0,082)	(0,160)	(0,082)
Tendencia (TEND)	ee	0,031 (0,010)	0,049 (0,012)	0,035 (0,010)	0,054 (0,032)	0,034 (0,103)	0,054 (0,013)
	p	(0,002)	(0,0002)	(0,0006)	(0,0001)	(0,001)	(0,0001)
Logaritmo de la Población (LogPOB)	ee		-1,170 (0,418)		-1,170 (0,425)		-1,250 (0,423)
	p		(0,006)		(0,007)		(0,004)
Logaritmo de Producción Industrial Total (LogPROT)	ee			-0,105 (0,049)	-0,105 (0,048)		
	p			(0,036)	(0,032)		
Producción Industrias altamente contaminantes (PROC)	ee					4,26e-12 (3,86e-12)	5,78e-12 (3,89e-12)
	p					(0,272)	(0,1411)
Constante	ee	0,642 (0,840)	12,888 (4,620)	2,624 (1,227)	14,881 (4,9681)	0,452 (0,853)	13,529 (4,641)
	p	(0,446)	(0,006)	(0,034)	(0,004)	(0,563)	(0,004)
Estadísticas							
<i>i</i>		87	87	87	87	87	87
T		4	4	4	4	4	4
N		348	348	348	348	348	348
R²		0,060	0,081	0,071	0,093	0,063	0,087

Los errores estándar robustos (ee) y el p-valor (p) se encuentran entre paréntesis

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, la variable de LogPIB^2 mostró un comportamiento adecuado con respecto a los signos, lo que puede llevar a pensar que sí puede existir una curva en forma de campana. Por el contrario, los resultados de las regresiones al incluir el LogPIB^3 mostraron una variabilidad en los resultados cuando se agrega cualquier otra variable diferente al PIB, esta variabilidad se puede presentar por la existencia de multicolinealidad con las demás variables y por tal motivo estos resultados se retiran de los resultados principales, pero pueden ser consultados en el Anexo 4.

Ahora, la variable de tendencia TEND mostró siempre un signo positivo lo cual es concordante con el comportamiento del LogPIB , el cual muestra una tendencia creciente a lo largo del tiempo, adicional. Esta variable mostró ser significativa al 10% en los modelos presentados. De la misma manera, la variable de LogPOB presentó un signo negativo en los diferentes modelos, lo cual es coherente con la teoría detrás de la curva ambiental de Kuznets.

En cuanto a LogPROT, la variable presentó un signo negativo, lo que muestra una relación coherente según la literatura. En cambio, el coeficiente estimado de la variable PROC tiene un signo no esperado y por tanto pierde la concordancia que tenía la producción industrial contaminante con el empeoramiento del índice de calidad del agua. Finalmente, la constante en un dato panel de efectos fijos se asimila al punto de corte de la curva, pero la interpretación en este caso es irrelevante. Ahora bien, los R^2 de todos los modelos son muy bajos, lo cual puede ser causado por la falta de variables control, pero pierde importancia al querer establecer las relaciones positivas y negativas de la curva de Kuznets ambiental. En general, estas estimaciones van de la mano con la literatura.

Por lo que refiere a los resultados de las estimaciones del panel de emisión de PM_{10} , en la Tabla 4 se muestra el resumen del comportamiento de las diferentes variables explicativas. El signo positivo de la variable LogPIB, concuerda con lo esperado en la literatura, al igual que la variable LogPIB^2 la cual mostró un signo negativo en todas las estimaciones presentadas. Con respecto al LogPIB^3 , se encontró que todos los coeficientes presentaron un signo positivo, lo cual podría referirse a que en lugar tener una curva en forma de “U” invertida, se tendría una “N”. Sin embargo, los resultados se muestran en el Anexo 4, debido a que distorsionaba los resultados del LogPIB y LogPIB^2 .

Por otra parte, la tendencia mostró un coeficiente positivo en todas las estimaciones como era de esperarse. En relación con la variable de LogPOB, se observó un signo positivo lo que concuerda con la literatura que entre más personas más se contamina. Con respecto a las variables industriales de LogPROT y PROC, se observó que ambas mostraron un signo positivo y significativo, lo que puede ser consistente con lo mencionado sobre la curva ambiental de Kuznets, donde uno de los sectores económicos que más produce contaminación es el industrial.

Para finalizar, el R^2 es pequeño e indica la falta de variabilidad explicada en las estimaciones para la emisión de material particulado. Este resultado se tiene en los dos paneles, lo que incita a no realizar interpretaciones de las magnitudes de ninguno de los coeficientes, dado que no se incluyen suficientes variables control que permitan tener mejor explicación de la variabilidad y por este motivo se realizan los análisis sobre la relación que existe según los signos.

Tabla 4: Resultados de la regresión para panel de emisión de PM₁₀

Variable dependiente: Logaritmo de emisiones de PM ₁₀							
Regresoras		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Logaritmo del Indicador		1,115	1,074	0,849	0,852	1,069	1,029
Importancia Económica municipal (LogPIB1)	ee	-0,322	(0,340)	(0,326)	(0,327)	(0,316)	(0,333)
	p	(0,001)	(0,003)	(0,012)	(0,012)	(0,001)	(0,003)
Logaritmo del Indicador		-0,087	-0,085	-0,066	-0,067	-0,084	-0,082
Importancia Económica municipal al cuadrado (LogPIB2)	ee	(0,023)	(0,024)	(0,023)	(0,023)	(0,022)	(0,024)
	p	(0,0004)	(0,0009)	(0,008)	(0,007)	(0,0005)	(0,011)
Tendencia (TEND)		0,015	0,008	0,007	0,006	0,017	0,011
	ee	(0,007)	(0,097)	(0,007)	(0,009)	(0,007)	(0,010)
	p	(0,038)	(0,385)	(0,350)	(0,496)	(0,023)	(0,286)
Logaritmo de la Población (LogPOB)			0,572		0,092		0,576
	ee		(0,524)		(0,577)		(0,519)
	p		(0,028)		(0,874)		(0,272)
Logaritmo de Producción Industrial Total (LogPROT)	ee			0,116	0,113		
	p			(0,040)	(0,047)		
				(0,006)	(0,022)		
Producción Industrias altamente contaminantes (PROC)	ee					8,14e-12	8,17e-12
	p					(2,94e-12)	(2,91e-12)
						(0,007)	(0,007)
Constante		0,898	-5,560	-0,978	-1,954	0,946	-5,563
	ee	(1,008)	(5,832)	(1,155)	(6,058)	(0,998)	(5,795)
	p	(0,377)	(0,345)	(0,401)	(0,748)	(0,348)	(0,342)
Estadísticas							
<i>i</i>		51	51	51	51	51	51
T		7	7	7	7	7	7
N		357	357	357	357	357	357
R²		0,065	0,070	0,087	0,087	0,077	0,083

Los errores estándar robustos (ee) y el p-valor (p) se encuentran entre paréntesis

Fuente: Elaboración propia

6. CONCLUSIONES

Debido a la gran importancia que han adquirido los temas ambientales y de desarrollo sostenible en los últimos años, este documento ha buscado establecer la relación que existe entre el deterioro ambiental y el ingreso, junto con la población y las variables de producción industrial por medio de la curva de Kuznets ambiental. Las relaciones analizadas por medio de un modelo de datos panel y los resultados parecen sugerir la existencia de la relación basada en la CAK, ya que las variables fueron significativas y los signos obtenidos con las variables de LogPIB y LogPIB² indican que Colombia puede estar en la parte creciente de la curva ambiental de Kuznets, lo que hace necesario

imponer algún tipo de freno en pro de mejorar el medioambiente y ser sensatos al aceptar que se necesario cuidarlo para el futuro.

La existencia de la relación de la CAK en Colombia muestra que un aumento en el ingreso da como resultado un mayor nivel de deterioro ambiental, pero también llega a un punto donde el ingreso se traduce en menos deterioro. Sin embargo, es de aclarar que no es correcto afirmar que en contraparte los países con mayores ingresos tienen niveles más bajos de contaminación, ya que, como se mencionó en el marco teórico, existen países desarrollados con altos niveles de contaminación. Todo va de la mano con la política ambiental que se ejerce y las eficiencias tecnológicas que puedan tener a disposición, pero en las estimaciones realizadas en este documento no fue posible incluir ninguna variable control de ese estilo.

Con respecto a la relación encontrada con la población, los resultados indican que el número de personas es importante para analizar el deterioro ambiental, puesto que entre mayor sea el número de personas el deterioro se agrava. Así, se hace necesaria la capacitación temprana a las personas para sensibilizar sobre la importancia del tema ambiental y así reducir los malos hábitos que poseen. Todo por medio de una educación ambiental más intensa, disipando así un poco el aumento que muestran cifras como la huella ecológica, contaminación de las fuentes hídricas, entre otros. Aunque es entendible que en las condiciones de desigualdad en Colombia no se logre una cobertura suficiente para generar un gran impacto es necesario empezar ahora.

Un resultado contradictorio para el panel de la calidad del agua es el signo de la variable PROC ya que tiene un signo positivo y no es concordante con la literatura. Esta contradicción puede deberse a los valores de cero que toman algunos individuos y que el panel solo cuenta con una temporalidad de cuatro períodos. El aumento de los ingresos dado por un aumento de la producción industrial contaminante podría ser un indicio de que Colombia es un país altamente manufacturero (según las cuentas nacionales esta actividad pesa cerca de 11% del PIB), y cerca del 21% de las exportaciones son de bienes industriales según el DANE, por lo que podría decir intuitivamente que se cumple la hipótesis de paraísos contaminantes, pero esto debe verse en un estudio con mucho más detalle.

Sin embargo, si se cumpliera la anterior hipótesis, se hace necesario abogar por compensaciones por el costo ambiental y afectaciones a la salud de las personas que este implica. Estas compensaciones pueden venir en diferentes formas como transferencias de tecnología, capacitaciones o programas de cooperación y mejoras en los precios pagados para los productos

elaborados en condiciones sostenibles. Sin embargo debe continuar la preocupación para que el país no se convierta en la opción de los países desarrollados para complacer sus patrones de consumo.

En general dado lo observado en los dos ejercicios de panel es que los modelos son muy sensibles a cambios en sus especificaciones, sus bases de datos y el periodo de estudio, lo que puede derivar en un cambio en la forma de la CAK. En suma, el tema ambiental se debe ver como un todo, pues las relaciones con las diferentes variables macroeconómicas tienden a cambiar y depende principalmente de los contaminantes o indicadores que se usen para realizar los ejercicios, para determinar correctamente en que parte de la curva se encuentra ubicado Colombia.

Después de todo, vale la pena recordar que algunos de los estudios en la revisión de literatura mencionaban que los ejercicios econométricos suelen ser un poco débiles. Existen discrepancias entre países y dentro del país por diferencias en los patrones de consumo, patrones económicos y sociales. Estos factores no son sencillos de incluir en las estimaciones dada la poca información desagregada o la inexistencia de la información, pero que si afectan tanto directa como indirectamente la relación entre el ingreso y la degradación ambiental.

Finalmente, el deterioro ambiental en Colombia en estos tiempos demanda acciones más fuertes y concretas, para poder disminuir los efectos adversos de los cambios ambientales. Debe existir un cambio en la matriz productiva mucho más sustentable y enfocar las políticas en mayor generación de inversión en investigación y en educación. Es por medio de análisis como el de este documento que se puede comenzar a evidenciar que los temas económicos pueden influir fuertemente en los temas ambientales, sin dejar de lado todas las políticas ambientales más fuertes que se deberían implementar en Colombia.

7. REFERENCIAS

- Abdoul, M., Kamoun, O., y Hamdi, B. (2018). The impact of economic growth, population density, and FDI inflows on CO2 emissions in BRIC countries: Does the Kuznets curve exist? *Empirical Economics*, 1717-1742.
- Acaravci, A., y Ozturk, I. (2010). On the relationship between energy consumption, CO2 emissions and economic growth in Europe. *Energy*, 5412-5420.
- Al-mulali, U., Tang, C. F., y Ozturk, I. (2015). Estimating the environmental Kuznets Curve hypothesis: Evidence from Latin America and the Caribbean countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 918-924.
- Ansari, M. A., Haider, S., y Khan, N. (2020). Environmental Kuznets curve revisited: An analysis using ecological and material footprint. *Ecological Indicators*, 115.
- Apablaza, M., y Contreras, H. (2016). *Crecimiento económico y contaminación: Curva Ambiental de Kuznets para Chile*. ANÁLISIS Centro de Políticas Públicas.
- Bartelmus, P. (2008). *Quantitative eco-nomics: How sustainable are our economies?* Springer.
- Bimonte, S. (2002). Information access, income distribution and the Environmental Kuznets Curve. *Ecological Economics*, 145-156.
- Calvo Garcia, L. (2013). *Medición de la relación entre el crecimiento económico y emisiones de CO2 y PM10 en Colombia (Una estimación de la curva de Kuznets ambiental)*. Bogotá: Universidad Javeriana.
- Catalán, H. (2014). Environmental Kuznets Curve: Implications for Sustainable Growth. *Economía Informa*, 19-37.
- Chertow, M. (2001). The IPAT Equation and Its Variants. *Changing Views of Technology and Environmental Impact*.
- Colciencias. (10 de 08 de 2019). *Colombia, el segundo país más biodiverso del mundo*. Obtenido de https://minciencias.gov.co/sala_de_prensa/colombia-el-segundo-pais-mas-biodiverso-del-mundo
- Cole, M. A. (2004). Trade, the pollution haven hypothesis and the environmental Kuznets curve: examining the linkages. *Ecological Economics* 48, 71-81.
- Correa, F., Vasco, A., & Montoya, C. (2005). *La curva medio ambiental de Kuznets: Evidencia empírica para Colombia*. Grupo de Economía Ambiental (GEA).

- Costanza, R. (1995). Economic Growth, Carrying Capacity and the Environment. *Ecological Economics*, 15, 89-90.
- Cui, P., Xia, S., y Hao, L. (2019). Do different sizes of urban population matter differently to CO2 emission in different regions? Evidence from electricity consumption behavior of urban residents in China. *Journal of Cleaner Production*.
- DANE. (2019). *Cuenta ambiental y económica de flujos de energía*. Bogotá: DANE.
- DANE. (Junio de 2019). *Departamento Administrativo Nacional de Estadística*. Obtenido de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/fichas/metodologia_CD-01_V5.pdf
- DANE. (10 de enero de 2020). *Departamento Administrativo Nacional de Estadística*. Obtenido de Cuenta Ambiental y económica de flujos de agua: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-satelite/cuenta-satelite-ambiental-csa#cuenta-ambiental-y-economica-de-flujos-del-agua-en-unidades-fisicas>
- Delibes, M., y Catro, M. D. (2005). *La tierra herida. ¿Qué mundo heredarán nuestros hijos?* Barcelona: Destino.
- Dinda, D. C. (2002). Causality between income and emission: a country Group specific econometric analysis. *Ecol Econ*, 40.
- Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey. *Ecological Economics*, 431-455.
- Dutt, K. (2009). Governance, institutions and the environment income relationship: across country study. *Environment, Development and Sustainability*, 705-723.
- FAO. (2006). *Las repercusiones del ganado en el medio ambiente*. Obtenido de <http://www.fao.org/ag/esp/revista/0612sp1.htm>
- Gitli, E., y Hernández, G. (2002). La existencia de la curva de Kuznets ambiental (CKA) y su impacto sobre las negociaciones internacionales. *Centro internacional de Política Económica*.
- Global Footprint Network. (2019). *National Footprint Accounts 2019 edition (Data Year 2016)*. The world Bank.
- Grossman, G., y Krueger, A. (1991). Environmental impacts of a North American free trade agreement. *National Bureau of Economic Research*.
- He, J., y Richard, P. (2010). Environmental Kuznets curve for CO2 in Canada. *Ecological Economics*, 1083-1093.
- Johnson, D., Ambrose, S., Bassett, T., Bowen, M., Crummey, D., Isaacson, J., . . . Winter, A. E. (1997). Meanings of environmental terms. *Journal of Environmental Quality*, 581-589.

- Kaika, D., y Zervas, E. (2013). The Environmental Kuznets Curve (EKC) theory-Part A: Concept, causes and the CO2 emissions case. *Energy Policy*, 1392-1402.
- Komen, M., Gerking, S., y Folmer, H. (1997). Income and environmental R&D: empirical evidence from OECD countries. *Environmental and Development Economics*, 505-515.
- López, A. R., Nieto, Á. M., Ramos, J. E., y Golpe, A. (2015). Studying the relationship between economic growth, CO2 emissions, and the environmental Kuznets curve in Venezuela (1980-2025). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 602-614.
- Monserate, M. Z., Zambrano, C. S., Penafie, J. D., Monserate, A. Z., y Ruano, M. A. (2018). Testing environmental Kuznets curve hypothesis in Peru: The role of renewable electricity, petroleum and dry natural gas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4170-4178.
- Naciones Unidas. (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático., (pág. 3).
- Olale, E., Ochuodho, T., Lantz, V., y Armali, J. E. (2018). The environmental Kuznets curve model for greenhouse gas emissions in Canada. *Journal of Cleaner Production*, 859-868.
- OMM. (marzo de 2019). *Organización Meteorológica Mundial*. Obtenido de <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/los-niveles-de-gases-de-efecto-vernadero-en-la-atm%C3%B3sfera-alcanzan-un>
- Panayotou, T. (2003). *Economic Growth and the environment*. Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa.
- Pao, H., y Tsai, C. (2010). CO2 emissions, energy consumption and economic growth in BRIC countries. *Energy Policy*, 38.
- Pinzón, D., y González, C. (2018). *Curva de Kuznets Ambiental: Evidencia empírica para Colombia 1971-2014*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- Pontarollo, N., y Muñoz, R. M. (2019). Land consumption and income in Ecuador: A case of an inverted environmental Kuznets curve. *Ecological Indicators*.
- Richmond, A., y Kaufmann, R. (2006). Is there a turning point in the relationship between income and energy use and/or carbon emissions? *Ecological Economics*, 176-189.
- Rodriguez, N., McLaughlin, M., y Pennock, D. (2018). *Soil Pollution a Hidden Reality*. Roma: FAO.
- Sapkota, P., y Bastola, U. (2017). Foreign direct investment, income, and environmental pollution in developing countries: Panel data analysis of Latin America. *Energy Economics*, 206-212.
- Selden, T., y Song, D. (1994). Environmental quality and development: is there a Kuznets curve for air pollution emissions? *Journal of Environmental Economics and Management*, 147-162.

- Semana. (junio de 2019). *Qué tiene que ver El Niño con el drástico aumento del CO2 en la atmósfera*. Obtenido de Semana Sostenible: <http://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/concentracion-de-co2-en-la-atmosfera-sufrio-un-aumento-historico-en-2016/38874>
- Shafik, N., y Bandyopadhyay, S. (1992). *Economic Growth and Environmental Quality: Time series and Cross Country Evidence*. World Bank.
- Soytas, U., Sari, R., y T., B. (2007). Energy consumption, income, and carbon emissions in the United States. *Ecological Economics*, 482-489.
- Uchiyama, K. (2016). *Environmental Kuznets Curve Hypothesis and Carbon Dioxide Emissions*. Japón: Development Bank of Japan Research Series.
- Yang, H., He, J., y Chen, S. (2015). The fragility of the Environmental Kuznets Curve: Revisiting the hypothesis with Chinese data via an "Extreme Bound Analysis". *Ecological Economics*, 41-58.
- Zilio, M. (2012). Curva de Kuznets ambiental, la validez de sus fundamentos en países en desarrollo. *Cuadernos de Economía Vol.35*, 43-54.

8. ANEXOS

Anexo 1: Industrias altamente contaminante

Grupo Industrial CIIU 4	Descripción
107	Elaboración de azúcar y panela
170	Fabricación de papel, cartón y productos de papel y cartón
191	Fabricación de productos de hornos de coque
192	Fabricación de productos de la refinación del petróleo
201	Fabricación de sustancias químicas básicas, abonos y compuestos inorgánicos nitrogenados, plásticos y caucho sintético en formas primarias
202	Fabricación de otros productos químicos
210	Fabricación de productos farmacéuticos, sustancias químicas medicinales y productos botánicos de uso farmacéutico
231	Fabricación de vidrio y productos de vidrio
239	Fabricación de productos minerales no metálicos n.c.p.
241	Industrias básicas de hierro y de acero
242	Industrias básicas de metales preciosos y de metales no ferrosos
243	Fundición de metales
251	Fabricación de productos metálicos para uso estructural, tanques, depósitos y generadores de vapor
259	Fabricación de otros productos elaborados de metal y actividades de servicios relacionadas con el trabajo de metales

Anexo 2: Tabla de correlaciones

- Panel de calidad del agua

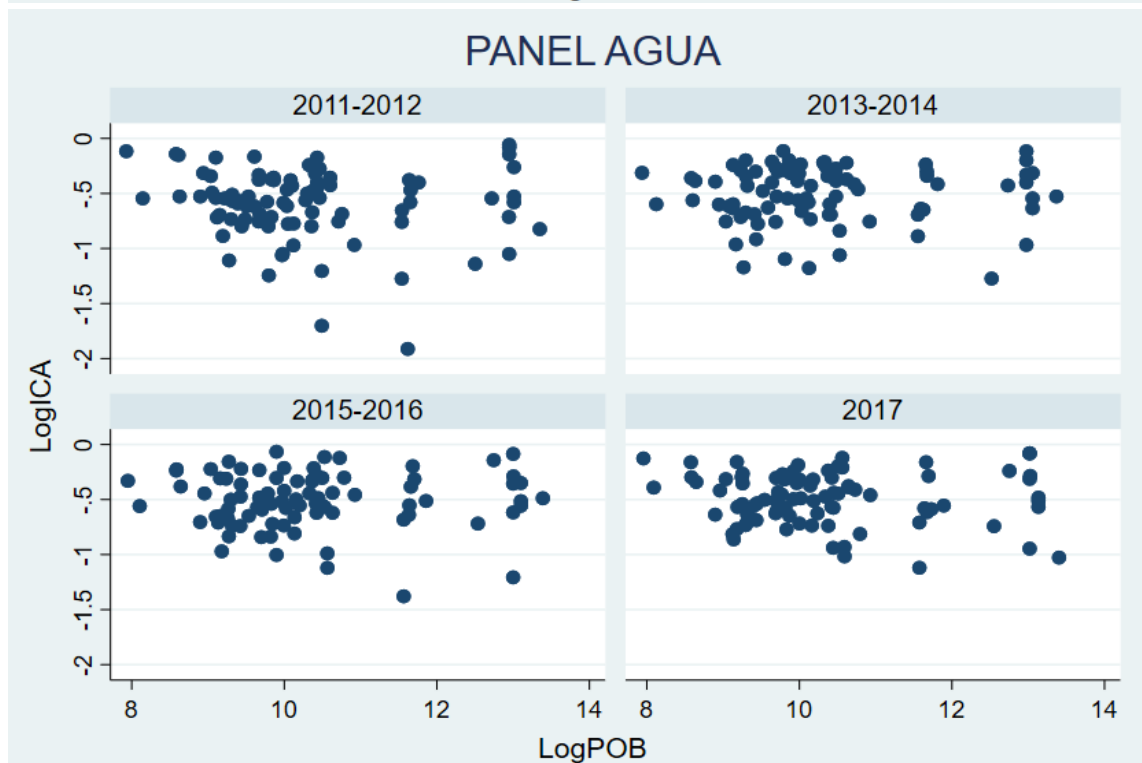
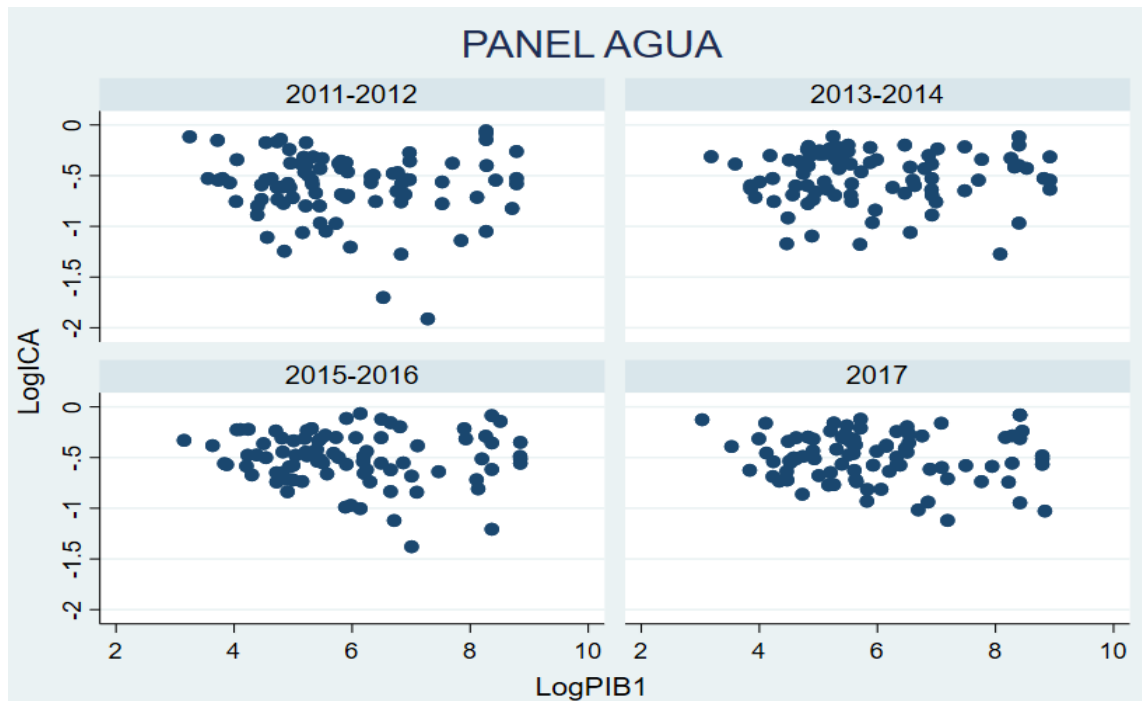
	LogICA	LogPIB1	LogPIB2	LogPIB3	LogPOB	LogPROT	PROC
LogICA	1,000						
LogPIB1	-0,054	1,000					
LogPIB2	-0,040	0,993	1,000				
LogPIB3	-0,027	0,975	0,995	1,000			
LogPOB	-0,043	0,868	0,880	0,882	1,000		
LogPROT	-0,313	0,067	0,050	0,034	-0,077	1,000	
PROC	-0,194	-0,083	-0,103	-0,122	-0,173	0,647	1,000

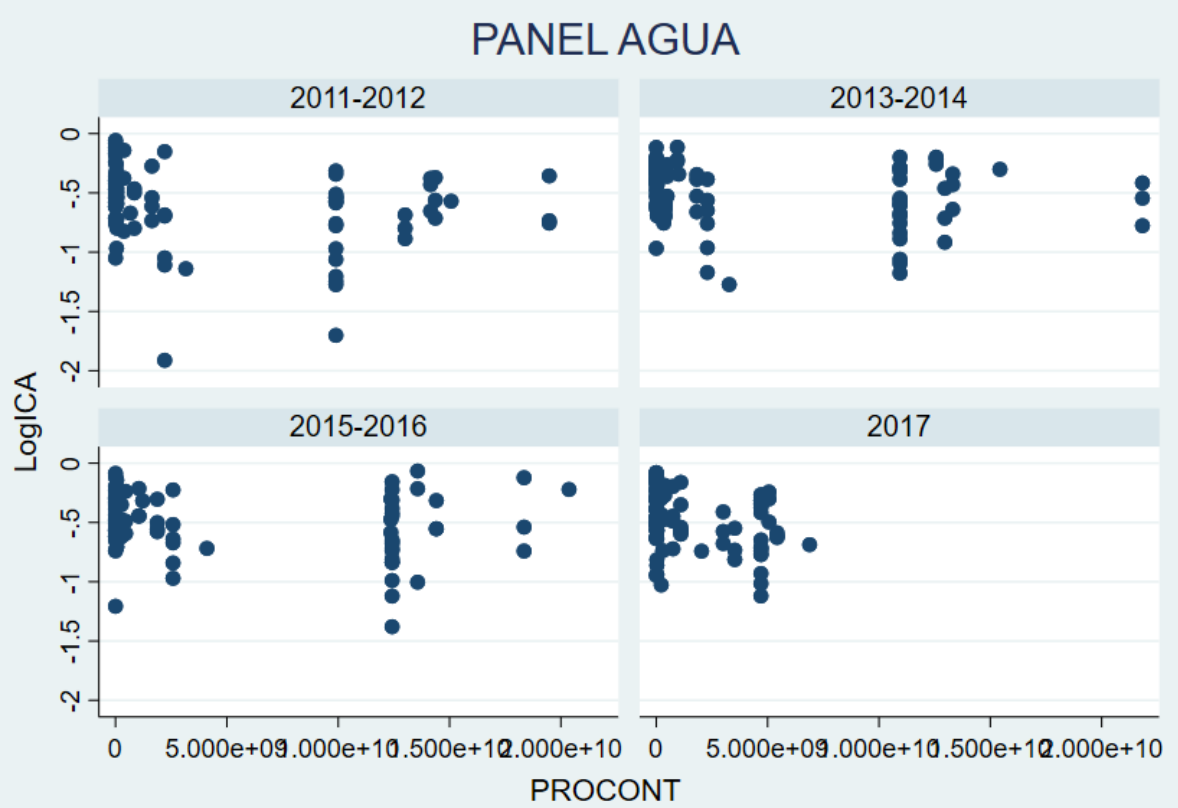
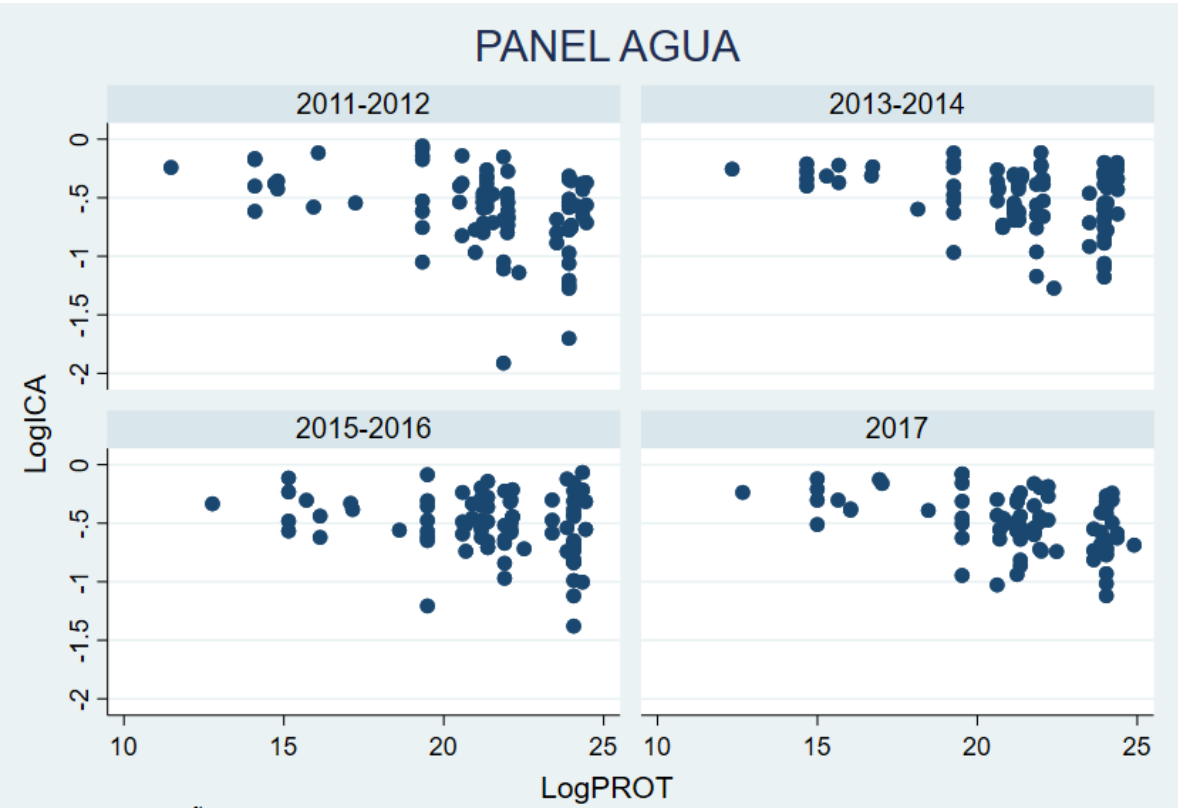
- Panel de emisión de PM₁₀

	LogAIRE	LogPIB1	LogPIB2	LogPIB3	LogPOB	LogPROT	PROC
LogAIRE	1,000						
LogPIB1	0,160	1,000					
LogPIB2	0,173	0,992	1,000				
LogPIB3	0,182	0,975	0,995	1,000			
LogPOB	0,079	0,791	0,770	0,741	1,000		
LogPROT	0,151	0,590	0,577	0,561	0,567	1,000	
PROC	0,243	0,614	0,624	0,623	0,564	0,733	1,000

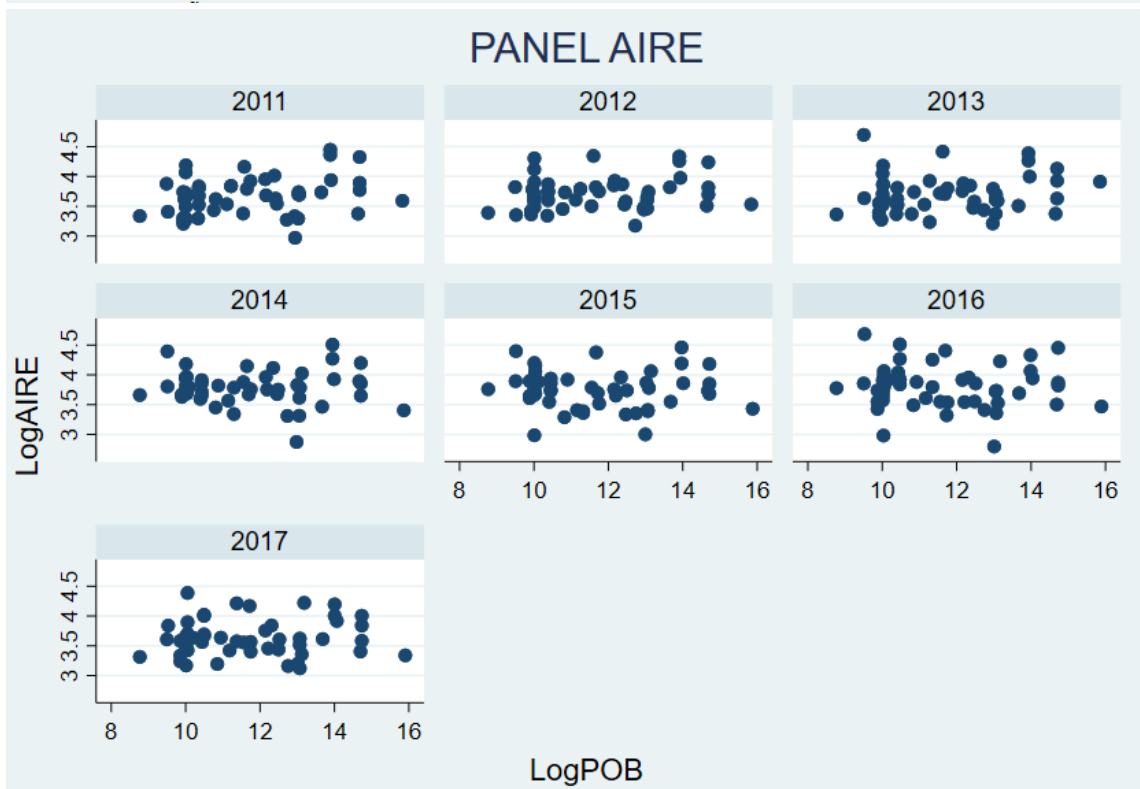
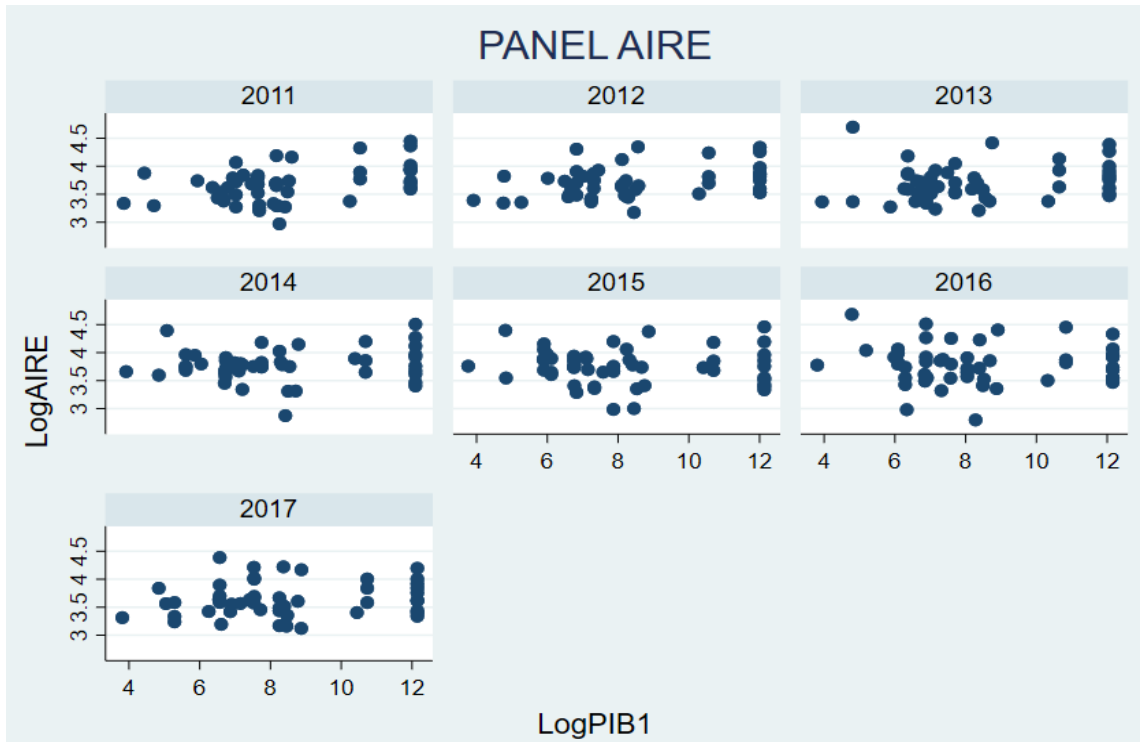
Anexo 3: Diagramas de dispersión

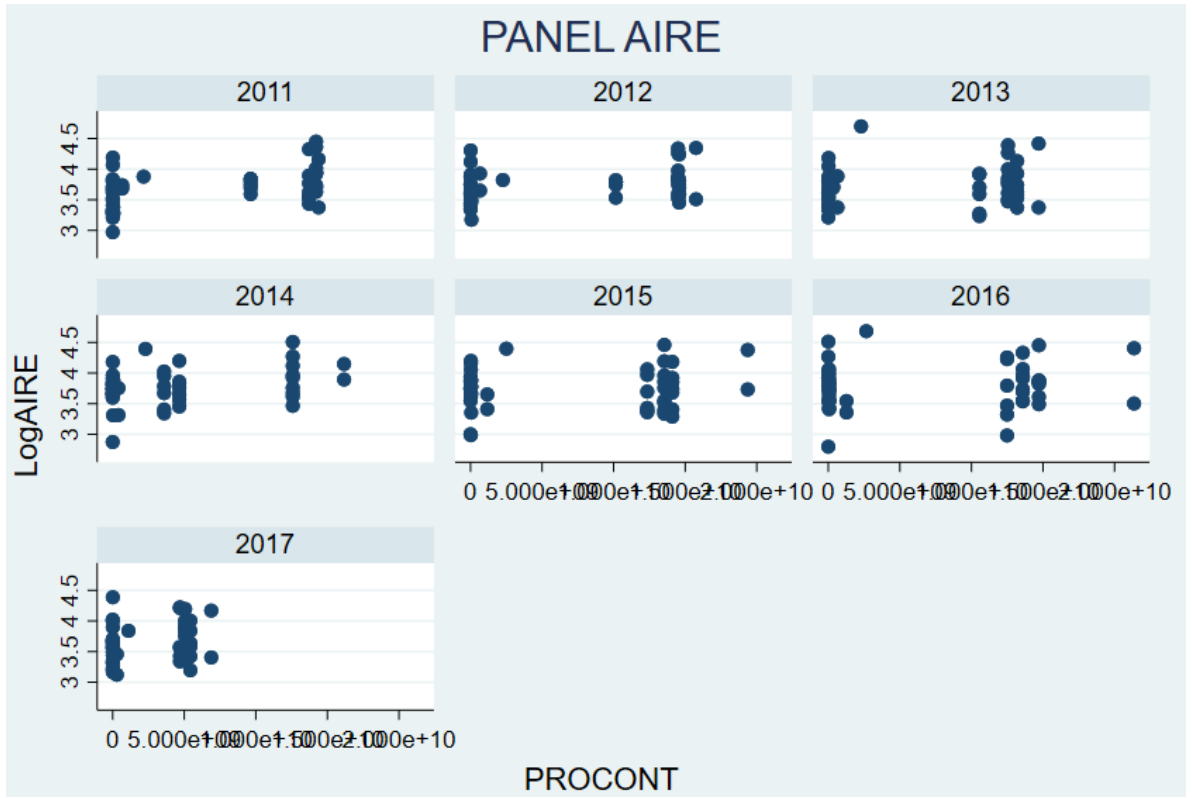
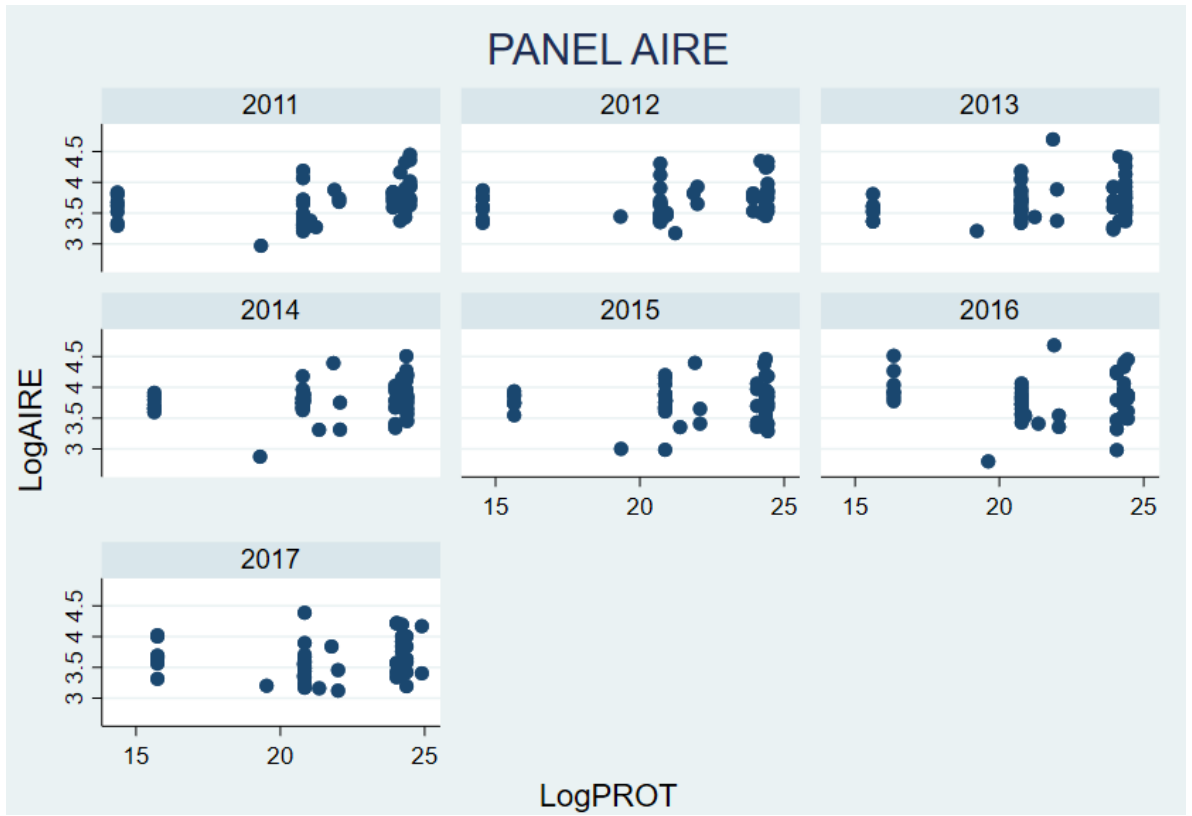
- Diagramas de dispersión panel de calidad del agua





- Diagramas de dispersión panel aire





Anexo 4: Estimaciones con LogPIB³

- Panel de Calidad del Agua

Variable dependiente: Logaritmo del Incador de Calidad del Agua						
Regresoras	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Logaritmo del Indicador	-0,331	-0,202	-0,879	-0,739	-0,286	-0,132
Importancia Económica municipal (LogPIB1)	ee (1,157)	(1,116)	(1,218)	(1,169)	(1,165)	(1,127)
	p (0,775)	(0,856)	(0,472)	(0,529)	(0,806)	(0,906)
Logaritmo del Indicador	0,017	-0,012	0,120	0,089	0,013	-0,019
Importancia Económica municipal al cuadrado (LogPIB2)	ee (0,200)	(0,194)	(0,213)	(0,205)	(0,201)	(0,195)
	p (0,932)	(0,951)	(0,573)	(0,664)	(0,947)	(0,921)
Logaritmo del Indicador	0,001	0,003	-0,004	-0,002	0,0014	0,004
Importancia Económica municipal al cubo (LogPIB3)	ee (0,011)	(0,010)	(0,012)	(0,011)	(0,011)	(0,011)
	p (0,907)	(0,748)	(0,700)	(0,839)	(0,901)	(0,732)
Tendencia (TEND)	0,031	0,048	0,037	0,055	0,034	0,054
	ee (0,010)	(0,012)	(0,010)	(0,013)	(0,010)	(0,013)
	p (0,002)	(0,0002)	(0,0005)	(0,0001)	(0,001)	(0,0001)
Logaritmo de la Población (LogPOB)		-1,179		-1,164		-1,260
	ee	(0,419)		(0,426)		(0,424)
	p	(0,006)		(0,007)		(0,003)
Logaritmo de Producción Industrial Total (LogPROT)			-0,110	-0,108		
	ee		(0,052)	(0,050)		
	p		(0,040)	(0,037)		
Producción Industrias altamente contaminantes (PROC)					4,27e-12	5,80e-12
	ee				(3,86e-12)	(3,90e-12)
	p				(0,272)	(0,140)
Constante	0,392	12,318	3,613	15,311	0,228	12,917
	ee (2,182)	(4,909)	(2,778)	(5,410)	(2,207)	(4,949)
	p (0,857)	(0,014)	(0,196)	(0,005)	(0,917)	(0,010)
Estadísticas						
<i>i</i>	87	87	87	87	87	87
T	4	4	4	4	4	4
N	348	348	348	348	348	348
R²	0,060	0,081	0,071	0,093	0,063	0,087

Los errores estándar robustos (ee) y el p-valor (p) se encuentran entre paréntesis

- Panel de contaminación del aire

Variable dependiente: Logaritmo de emisiones de PM_{10}						
Regresoras	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Logaritmo del Indicador	1,168	1,731	1,515	1,530	1,838	1,882
Importancia Económica municipal (LogPIB1)	ee (1,082)	(1,078)	(1,066)	(1,056)	(1,078)	(1,075)
	p (0,125)	(0,114)	(0,161)	(0,153)	(0,094)	(0,086)
Logaritmo del Indicador	-0,163	-0,172	-0,154	-0,156	-0,185	-0,194
Importancia Económica municipal al cuadrado (LogPIB2)	ee (0,136)	(0,135)	(0,134)	(0,133)	(0,136)	(0,135)
	p (0,237)	(0,211)	(0,257)	(0,246)	(0,179)	(0,158)
Logaritmo del Indicador	0,003	0,003	0,003	0,004	0,004	0,005
Importancia Económica municipal al cubo (LogPIB3)	ee (0,005)	(0,005)	(0,005)	(0,053)	(0,006)	(0,006)
	p (0,564)	(0,509)	(0,495)	(0,484)	(0,439)	(0,390)
Tendencia (TEND)	0,014	0,007	0,006	0,005	0,015	0,009
	ee (0,007)	(0,010)	(0,008)	(0,009)	(0,008)	(0,010)
	p (0,072)	(0,491)	(0,474)	(0,615)	(0,046)	(0,389)
Logaritmo de la Población (LogPOB)		0,593		0,112		0,604
	ee	(0,527)		(0,579)		(0,521)
	p	(0,266)		(0,846)		(0,251)
Logaritmo de Producción Industrial Total (LogPROT)	ee		0,117	0,112		
	p		(0,040)	(0,047)		
			(0,005)	(0,022)		
Producción Industrias altamente contaminantes (PROC)	ee				8,49e-12	8,56e-12
	p				(2,94e-12)	(2,91e-12)
					(0,005)	(0,005)
Constante	-0,516	-7,424	-2,645	-3,871	-0,948	-7,991
	ee (2,719)	(6,438)	(2,800)	(6,389)	(2,712)	(6,389)
	p (0,850)	(0,254)	(0,349)	(0,547)	(0,728)	(0,216)
Estadísticas						
<i>i</i>	87	87	87	87	87	87
T	4	4	4	4	4	4
N	357	357	357	357	357	357
R²	0,066	0,072	0,088	0,089	0,080	0,085

Los errores estándar robustos (ee) y el p-valor (p) se encuentran entre paréntesis