

## **Emisiones de CO<sub>2</sub> y factores de presión ambiental en México y Ecuador: economía, población y gestión ambiental**

Abril Yuriko Herrera Ríos<sup>1\*</sup> (<https://orcid.org/0000-0001-9301-9285>)

Lizbeth Guadalupe Galaz Rivera<sup>1</sup> (<https://orcid.org/0009-0000-1724-7796>)

Rosa Mayra Llerena Guevara<sup>2</sup> (<https://orcid.org/0000-0003-0923-4738>)

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Sinaloa, México. Av. de las Américas, Unidad 3 s/n, C. P. 80010, Culiacán, Sinaloa, México.

<sup>2</sup>Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador.

\*Autor para correspondencia: [yurikoherrera@uas.edu.mx](mailto:yurikoherrera@uas.edu.mx)

### **Resumen**

Este trabajo analizó la relación entre actividad económica, presión demográfica y ambiental con las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en México y Ecuador. A través de un modelo econométrico espacial del tipo Modelo de Error Espacial (Spatial Error Model [SEM] por sus siglas en inglés), se integraron datos de 56 entidades subnacionales de ambos países, incorporando como variables explicativas el Producto Interno Bruto, el logaritmo de la población y el volumen de agua residual. La variable dependiente fue la emisión anual de CO<sub>2</sub> por entidad. La matriz de pesos espaciales se construyó bajo el criterio de los cinco vecinos más cercanos utilizando coordenadas

geográficas. Los resultados muestran un efecto espacial significativo en los residuos del modelo ( $\lambda = -0.144, p < 0.01$ ), lo que justifica el uso del enfoque SEM. Las emisiones se asociaron de forma positiva con la población y el agua residual, mientras que el producto interno bruto (PIB) mostró una relación negativa marginal. Este análisis conjunto permite identificar patrones territoriales comunes de presión ambiental en América Latina, proponiendo una base para el diseño de políticas diferenciadas y sostenibles.

**Palabras clave:** contaminación atmosférica; emisiones de carbono; educación ambiental; sostenibilidad.

**Recibido:** 16 diciembre, 2025

**Aceptado:** 14 abril, 2026

## Introducción

El cambio climático se ha convertido en uno de los principales desafíos a nivel mundial, requiriéndose por ello de diagnósticos territoriales precisos, que cuenten con enfoques rigurosos, que permitan comprender cuáles son los factores asociados a ese deterioro ambiental (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico [OCDE] et al., 2022). Dentro de los múltiples indicadores que se emplean para evaluar este fenómeno se encuentran principalmente las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), las cuales han sido la variable más estudiada porque destacan por su relación directa con la actividad económica, el crecimiento urbano y la gestión ineficiente de los recursos naturales (Balza et al., 2024). En particular, los países en desarrollo se distinguen por ser los que enfrentan retos más significativos frente al cambio climático, esto se explica principalmente por estructuras institucionales frágiles, corrupción, persistencia de desigualdades territoriales y limitaciones en su capacidad técnica y financiera para gestionar recursos frente a situaciones de

vulnerabilidad y específicamente para temas sostenibles (CEPAL, 2022; Riveros-Gavilanes & Reyes-Vargas, 2023).

En el debate de la relación entre economía y medio ambiente, uno de los enfoques que más se ha discutido ha sido la curva ambiental de Kuznets (CAK). La cual plantea que existe una relación entre crecimiento económico y degradación ambiental que no es lineal, sino que se sigue una trayectoria con forma de U invertida. Enfoque basado en los estudios de Grossman & Krueger (1991).

De forma general, la CAK sugiere que, en las primeras fases de desarrollo un país incrementa la renta per cápita y aumenta de la misma forma la contaminación, esto se asocia por el uso intensivo de los recursos naturales (Grossman & Krueger, 1991). Sin embargo, una vez superado un umbral de ingresos, se espera que el mismo país destine más recursos a la educación, innovación, tecnología, la eficiencia energética y regulación ambiental, lo que ocasione una reducción progresiva de las emisiones contaminantes.

La teoría de la CAK ha sido ampliamente estudiada y debatida en distintos contextos, regiones, países, a través del tiempo. Por ejemplo, se ha observado que las economías industrializadas tienden a mostrar con mayor claridad este patrón, mientras que en países de renta media o baja los resultados han sido más ambiguos. En este sentido, investigaciones como la de Afifi (2012) evidencian que la validez de la hipótesis varía de acuerdo con el nivel de ingreso, y que en América Latina los resultados suelen ser heterogéneos debido a la influencia de factores institucionales, demográficos y geográficos. Estudios recientes también han destacado el papel de la calidad del gobierno y de la complejidad económica como determinantes que moldean la trayectoria ambiental de los países (Muñoz-Ramos & Osorio-Caballero, 2023).

En las últimas dos décadas, se han reproducido los estudios que intentan validar o refutar la hipótesis de la CAK en América Latina. Por ejemplo, Alzate-Rodríguez (2022) estudió la relación entre el crecimiento económico y la deforestación en Colombia desde la perspectiva de la CAK y descubrió patrones inconsistentes donde la degradación ambiental no depende únicamente del ingreso, sino de factores territoriales críticos como la gobernanza local y los conflictos de uso de. De forma similar, Terán-Pérez et al. (2025) examinaron 25 países del continente americano entre 2010 y 2020, encontrando evidencia empírica que respalda la existencia de una forma de U

invertida. En dicho estudio, se demostró que las variables como el consumo eléctrico, el comercio exterior y los impuestos ambientales presentan los signos esperados y significancia. Sin embargo, la mayoría de estos análisis han utilizado modelos econométricos lineales convencionales que tienden a ocultar la complejidad territorial. Además, la mayoría de los enfoques ignoran las interacciones espaciales entre regiones, a pesar de que la contaminación y las decisiones sobre políticas ambientales no se limitan a las fronteras administrativas. Por tanto, es prioritario desarrollar modelos empíricos que incorporen una dimensión espacial y territorial para comprender con mayor precisión los patrones de emisiones se mantienen al considerar las dinámicas espaciales en las 56 unidades territoriales de este estudio.

México cuenta con una economía de mayor escala y una estructura productiva diversificada, aunque persisten marcadas desigualdades entre el norte industrializado y el sur predominantemente agrícola (Elenes et al., 2024). Además, el país ha impulsado diversos instrumentos de política ambiental, como la Ley General de Cambio Climático, el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC), el Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de contaminación atmosférica, y la Norma Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-2011, orientada al control de emisiones de fuentes fijas (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2022). No obstante, la aplicación efectiva de estas medidas ha sido limitada en algunas regiones debido a brechas institucionales. Ecuador, por su parte, ha enfrentado históricamente desafíos derivados de su alta vulnerabilidad ambiental y su dependencia de sectores extractivos, particularmente petróleo y minería. A pesar de avances legislativos, como la inclusión de los derechos de la naturaleza en su Constitución de 2008, persisten limitaciones técnicas y financieras para implementar políticas ambientales eficaces a nivel provincial (Alvarado et al., 2024). Por esta razón, la elección de un modelo de econometría espacial resulta consistente con trabajos que han estimado emisiones a partir de inventarios sectoriales, como el presentado por Meza-López et al. (2021).

Esta investigación buscó contribuir a este esfuerzo al realizar un análisis comparativo entre México y Ecuador, dos países latinoamericanos que tiene un nivel de desarrollo intermedio, emisiones *per cápita* comparables y una cantidad significativa de entidades para realizar análisis territorial. Ambos países cuentan con trayectorias diferentes en términos de crecimiento económico, capacidad institucional y presión ambiental, así como procesos acelerados de urbanización,

industrialización parcial y expansión del consumo energético en las últimas décadas, lo que ha dado lugar a un notable incremento de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, sus estructuras productivas, sistemas de gobernanza y niveles de inversión en infraestructura medioambiental presentan contrastes que justifican una comparación detallada (OCDE, 2023; Guevara-Segarra et al., 2025).

Considerando lo anterior, el análisis de cincuenta y seis regiones (treinta y dos entidades en México y veinticuatro provincias en Ecuador) posibilitó captar la heterogeneidad territorial de dichos fenómenos, mientras que la exploración espacial mostró diferencias en la intensidad de dimensiones entre regiones reforzando la idoneidad de un enfoque econométrico espacial (Mahmood, 2023).

Además, se considera que ambos países son representativos de los desafíos medioambientales de América Latina, una región caracterizada por su elevada biodiversidad, su dependencia de los recursos naturales y la debilidad institucional de muchos de sus territorios (CEPAL, 2024). Ambos países cuentan con datos estadísticos subnacionales fiables sobre emisiones, población, producto interior bruto (PIB) y tratamiento de aguas residuales, lo que permite realizar estimaciones comparables con un mismo diseño metodológico. Cabe destacar que, en el caso de Ecuador, la perspectiva de Kuznets ya se ha utilizado para estudiar fenómenos estructurales como la desigualdad, lo que refuerza su relevancia metodológica en el análisis ambiental (Enríquez-Fuenmayor, 2020). Por último, la elección de estos dos países permite avanzar en el estudio de la CAK desde un enfoque empírico más localizado, territorializado y complementario.

El Modelo de Error Espacial (SEM) forma parte de la familia de modelos econométricos espaciales utilizados para analizar fenómenos en los que las variables presentan dependencia entre unidades geográficas vecinas. A diferencia de los modelos tradicionales, el SEM incorpora explícitamente la autocorrelación en los errores, lo que permite evitar estimaciones sesgadas cuando los residuos muestran patrones espaciales (Anselin, 1988). De esta manera, se empleó dicha técnica para evaluar si la relación entre el PIB, la población y el volumen de aguas residuales con las emisiones de CO<sub>2</sub> presentaba una dinámica diferenciada entre las 32 entidades mexicanas y las 24 provincias ecuatorianas. El uso del SEM no solo permite corregir la autocorrelación espacial en los residuos, sino que también capta la influencia que ejercen las regiones vecinas sobre las

condiciones medioambientales locales, lo que resulta especialmente relevante dada la alta heterogeneidad territorial de las 56 unidades analizadas.

A diferencia de estudios anteriores que se centraban exclusivamente en un solo país o en análisis agregados, el presente trabajo incorpora una perspectiva comparativa que permite identificar patrones entre la relación entre variables económicas, demográficas y ambientales. Por lo que buscó responder a una pregunta central: ¿cómo se manifiestan los patrones en la relación entre crecimiento económico, presión demográfica y calidad de la gestión ambiental respecto a las emisiones de CO<sub>2</sub> en México y Ecuador? Al abordar esta pregunta desde una perspectiva cuantitativa, territorial y comparativa, el estudio aspira a generar evidencia útil para el diseño de políticas públicas sostenibles que tomen en cuenta las especificidades de cada contexto.

## **Materiales y métodos**

### **Área de estudio**

Este estudio adopta un enfoque comparativo subnacional que abarca un total de 56 unidades territoriales: 32 estados de México y 24 provincias de Ecuador. Esta desagregación permite explorar con mayor precisión las disparidades regionales en términos de emisiones, estructura productiva, concentración poblacional y servicios ambientales. Además, al emplear datos del año 2020, se garantiza una base empírica homogénea y reciente que refleja las condiciones ambientales posteriores a la consolidación de políticas nacionales en materia climática.

La elección de México y Ecuador se debe a la importancia de ambos países dentro del contexto latinoamericano ya que, a pesar de ser considerados economías en desarrollo, las características de ambos son distintas, de manera estructural productiva y la presión ambiental objetos de este estudio. Esta diferencia nos permite observar las dinámicas territoriales que se asocian con las emisiones de CO<sub>2</sub>.

El análisis subnacional también permite detectar patrones diferenciados entre regiones que no son observables en estudios a nivel nacional, contribuyendo así a la comprensión de la heterogeneidad territorial que caracteriza los contextos de ambos países.

## **Metodología econométrica: modelo SEM combinado para México y Ecuador**

Con el objetivo de analizar la relación entre el PIB, la población, la generación de agua residual y las emisiones de CO<sub>2</sub> en México y Ecuador, se utilizó un modelo de econometría espacial del tipo Modelo de Error Espacial (SEM). Este modelo permite capturar la autocorrelación espacial en los errores que no son explicados por las variables observadas, lo que resulta pertinente cuando existen influencias indirectas entre regiones vecinas no captadas por las variables explicativas.

La elección del modelo SEM se justifica con base en los resultados del estadístico de Moran y la prueba LM, los cuales confirmaron la presencia de dependencia espacial en los residuos. El uso de este enfoque se alinea con lo propuesto por Anselin (1988), quien destaca que este tipo de modelo es idóneo cuando se busca controlar por efectos espaciales no observados en contextos de alta heterogeneidad territorial, como ocurre en América Latina.

### **Especificación del modelo SEM**

El modelo SEM tiene la siguiente forma estructural:

$$y = X\beta + \mu, \mu = \lambda W\mu + \varepsilon \quad (1)$$

Donde  $y$  es el vector de emisiones de CO<sub>2</sub> (variable dependiente);  $X$  es la matriz de variables explicativas;  $\beta$  es el vector de parámetros a estimar;  $\mu$  es el término de error con estructura espacial;  $W$  es la matriz de pesos espaciales;  $\lambda$  es el coeficiente de autocorrelación espacial en los errores; y  $\varepsilon$  es el error aleatorio.

La matriz de pesos espaciales se construyó con base en el criterio de k-vecinos más cercanos (KNN), considerando cinco vecinos geográficos para cada región. Se utilizaron los centroides de cada entidad (treinta y dos estados en México y veinticuatro provincias en Ecuador) para calcular la proximidad espacial. Posteriormente, la matriz fue estandarizada por filas para garantizar la interpretación adecuada de los coeficientes espaciales.

### Variables incluidas y signos esperados

El modelo se estimó con datos de corte transversal correspondientes al año 2020, empleando un total de cincuenta y seis observaciones (32 entidades en México y 24 provincias en Ecuador).

Las variables consideradas fueron las siguientes:

**Cuadro 1.** Variables incluidas en el modelo SEM y fuentes por país.

Variable	Descripción	Fuente (Ecuador)	Fuente (México)	Signo esperado
<b>Emisiones CO<sub>2</sub></b>	Emisiones anuales de CO <sub>2</sub> por entidad (toneladas)	Ministerio del Ambiente (MAE)	Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RENE)	—

<b>PIB</b>	PIB anual por entidad (millones de USD o pesos constantes)	Banco Central del Ecuador (BCE)	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)	+
<b>Log Población</b>	Logaritmo natural de la población total	Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC)	Consejo Nacional de Población (CONAPO)	+
<b>Agua residual</b>	Volumen anual de aguas residuales generadas (millones de m <sup>3</sup> )	Ministerio del Ambiente (MAE)	Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)	+

Fuente: Elaboración propia con base en información de MAE, INEC, BCE, CONAPO, INEGI, CONAGUA y RENE.

Se espera que el PIB, al representar una medida del crecimiento económico, ejerza un efecto positivo sobre las emisiones de CO<sub>2</sub>, particularmente en contextos donde el desarrollo está fuertemente vinculado a sectores industriales, manufactura intensiva, transporte motorizado o generación energética basada en combustibles fósiles (Grossman & Krueger, 1995). Esta relación puede ser aún más marcada en regiones que carecen de regulaciones ambientales estrictas o donde las políticas de mitigación son débiles o inexistentes. En este sentido, un mayor PIB puede reflejar mayor actividad económica pero también un aumento proporcional en la demanda energética, con implicaciones directas sobre los niveles de contaminación (Dinda, 2004).

Por su parte, la población total, medida en su forma logarítmica, se considera una “proxy demográfica” de presión ambiental. El crecimiento poblacional implica mayor concentración urbana, expansión territorial, y mayor generación de residuos, lo cual está asociado generalmente con el aumento de emisiones de CO<sub>2</sub>. En el mismo sentido, el volumen de aguas residuales generadas se interpreta como una variable indicadora de carga ambiental, ya que refleja tanto el consumo hídrico como el tratamiento insuficiente de contaminantes. Por lo tanto, ambas variables

se anticipan con un efecto positivo sobre las emisiones, al representar directamente el impacto del comportamiento humano y productivo sobre el medio ambiente.

## Estadísticos descriptivos

En este apartado se presentan los estadísticos descriptivos de las variables fundamentales del estudio, desglosados para México y Ecuador. Este comparativo es crucial, ya que permite identificar las disparidades en la magnitud de las actividades económicas, demográficas y el impacto ambiental entre ambas naciones.

Tal como se muestra en el Cuadro 2, se identifican similitudes en la estructura de las variables analizadas, pero también se notan diferencias en la magnitud de las emisiones de CO<sub>2</sub> entre los dos países. Por un lado, el valor mínimo en México llega aproximadamente a 2.13 millones de ton, mientras que el máximo en Ecuador apenas alcanza las 45,805 ton, lo que pone de manifiesto las diferencias en la escala de los valores registrados.

**Cuadro 2.** Estadísticos descriptivos de las variables por país

<b>Variable</b>	<b>País</b>	<b>Media</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>Emisiones de CO<sub>2</sub></b>	México	10,444,736.66	2,133,214.23	32,056,888.05
<b>PIB</b>	México	740,956.26	147,603.93	3,719,364.52
<b>Población</b>	México	3,937,938.25	731,391.00	16,992,418.00
<b>Agua residual</b>	México	7,159.41	1,549.00	20,837.00
<b>Emisiones de CO<sub>2</sub></b>	Ecuador	6,767.29	0.00	45,805.00

<b>Variable</b>	<b>País</b>	<b>Media</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>PIB</b>	Ecuador	4,246,933.60	254,823.89	26,558,266.92
<b>Población</b>	Ecuador	711,578.46	28,205.00	4,410,700.00
<b>Agua residual</b>	Ecuador	0.29	0.02	0.61

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de MAE, INEC, BAE, INEGI y CONAGUA, procesados mediante Python.

La variable agua residual muestra que en México hay un promedio de 7,159.41 unidades, en comparación con solo 0.29 en Ecuador. Esta discrepancia sugiere que existen disparidades en los niveles observados. De manera similar, el PIB promedio reportado para Ecuador es de 2.24 millones es numéricamente más alto que el de México (740 mil). Sin embargo, es importante interpretar esta diferencia como relación con la unidad monetaria utilizadas: Ecuador reporta en dólares (USD) mientras que en México lo hace en pesos (MXN).

Estos resultados descriptivos permiten poner en perspectiva las características de las unidades analizadas, lo que contribuye a una mejor comprensión de los resultados obtenidos en el modelo, Así como variaciones entre México y Ecuador que resultan relevantes para la interpretación del análisis espacial

## **Resultados y análisis**

Se presentan y analizan los principales resultados obtenidos a partir de la estimación del modelo de error espacial (SEM). El análisis se enfoca a examinar, por una parte, la relación que existe entre

las variables económicas, demográficas y ambientales respecto a las emisiones de CO<sub>2</sub>, por otro lado, encontrar hallazgos empíricos con las expectativas teóricas planteadas en la literatura particularmente en el marco de la Curva Ambiental de Kuznets (CAK). Con el propósito de facilitar esta comparación se incorpora una matriz de síntesis de resultados en términos de signo y magnitud relativa de los coeficientes estimados

Como se observa en el **Cuadro 3**, los resultados resultan coincidentes con la teoría. El coeficiente del PIB es negativo y estadísticamente significativo ( $P < 0.05$ ), lo que podría considerarse indicios de una eventual transición hacia niveles más bajos de intensidad de emisiones, en línea con la siguiente fase baja de la CAK, aunque sin evidencia concluyente de un punto de inflexión. Por otro lado, el logaritmo de la población exhibe un efecto positivo y significativo ( $P < 0.01$ ), confirmando el papel de la presión demográfica como un determinante en el aumento de las emisiones. Así como la variable agua residual presenta un efecto positivo y significativo ( $P < 0.05$ ), lo que se interpreta como un reflejo de las limitaciones en la infraestructura de gestión ambiental. Por último, el parámetro espacial  $\lambda$  resulta negativo y significativo ( $P < 0.01$ ), lo que evidencia la presencia de dependencia espacial en las emisiones y consolida la adecuación del modelo SEM para el análisis.

**Cuadro 3.** Contraste entre hallazgos empíricos y expectativas teóricas

<b>Variable</b>	<b>Signo esperado (CAK)</b>	<b>Resultado empírico</b>	<b>Interpretación</b>
<b>PIB</b>	Positivo o en forma U invertida	Negativo*	Indicios de transición hacia menor intensidad contaminante
<b>Logaritmo de la población</b>	Positivo	Positivo***	La presión demográfica intensifica la contaminación
<b>Agua residual</b>	Positivo	Positivo*	Refleja limitaciones en infraestructura de gestión ambiental

<b><math>\lambda</math> (efecto espacial)</b>	Negativo	Negativo**	Evidencia dependencia espacial y valida el modelo SEM
---	----------	------------	---

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados estimados en Python (2025).

La estimación del modelo de error espacial (SEM), mediante el método de máxima verosimilitud, mostró un ajuste adecuado, con un valor de pseudo  $R^2$  de 0.5206, lo que indica una capacidad explicativa moderada del modelo sobre las emisiones de  $CO_2$  (Cuadro 4). La presencia de multicolinealidad fue descartada, ya que todos los factores de inflación de la varianza (VIF) resultaron inferiores a dos (Figura 1), lo cual respalda la validez de las estimaciones.

**Cuadro 4.** Resultados del modelo SEM.

<b>PIB:</b>	$\beta = -1,631,128.25$	$p = 0.02759 *$
<b>Log (Población):</b>	$\beta = 4,113,209.51$	$p = 0.00000 ***$
<b>Agua Residual:</b>	$\beta = 2,268,760.97$	$P = 0.01083 *$
<b><math>\lambda</math>:</b>	$\beta = -0.144$	$P = 0.00912 **$

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados estimados en Python (2025).

	feature	VIF
0	const	1.000000
1	PIB	1.215332
2	log_Poblacion	1.848352
3	AguaResidual	1.927062

**Figura 1.** Factores de inflación de la varianza (VIF) por variable.

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados estimados en Python (2025). Imagen exportada desde Jupyter Notebook.

Los resultados econométricos indican que el coeficiente del PIB fue negativo y significativo ( $\beta = -1,631,128.25$ ;  $p = 0.02759$ ), lo cual puede reflejar una posible transición hacia una etapa de menor intensidad contaminante en regiones con mayor desarrollo económico. Este patrón podría ser consistente con la fase descendente de la Curva Ambiental de Kuznets.

Sin embargo, las variables logaritmo de la población ( $\beta = 2,731,677.57$ ;  $p < 0.0000$ ) y agua residual ( $\beta = 2,268,760.97$ ;  $p = 0.01083$ ) presentaron signos positivos y alta significancia, lo que confirma su papel como fuentes de presión ambiental. Estos hallazgos sugieren que un mayor volumen poblacional y un incremento en la generación de aguas residuales están asociados a mayores niveles de emisiones contaminantes, en línea con la literatura previa. El parámetro de autocorrelación espacial  $\lambda$  ( $\beta = -0.144$ ;  $p = 0.00912$ ) fue negativo y significativo lo que indica que existen patrones espaciales en los residuos no explicados por las variables incluidas. Este resultado valida la elección del modelo SEM, ya que confirma que las emisiones tienden a agruparse espacialmente entre regiones vecinas.

Por último, los datos corresponden al conjunto de entidades analizadas en ambos países, lo que permite identificar patrones comunes en la relación entre las variables consideradas. A pesar de las diferencias estructurales descritas en el área de estudio, se observan similitudes relevantes, en especial en el efecto positivo de la población y aguas residuales sobre las emisiones de CO<sub>2</sub>, lo que sugiere que las presiones ambientales relacionadas con el crecimiento demográfico y la gestión de recursos son bastantes en ambos contextos. Además, la relevancia del componente espacial indica que en ambos países las emisiones no son independientes entre regiones si no que muestran dinámicas territoriales de interconexión.

## **Análisis de resultados**

Los resultados de esta investigación muestran que tanto el tamaño de la población, como la generación de aguas residuales están positivamente vinculados con los niveles de emisiones, lo que

sugiere que la presión ambiental no solo proviene del crecimiento económico, sino también del comportamiento demográfico y de la capacidad institucional para gestionar el medio ambiente. Este hallazgo refuerza la idea de que el deterioro ambiental es un fenómeno complejo, que exige abordar simultáneamente aspectos estructurales, sociales y territoriales. Asimismo, pone de manifiesto que variables tradicionalmente consideradas secundarias (como el acceso a servicios de saneamiento o la densidad poblacional) pueden desempeñar un papel central en la configuración de las trayectorias de emisiones.

El PIB mostró un coeficiente negativo marginalmente significativo, lo que, aunque no concluyente, podría interpretarse como una señal de que algunas regiones están comenzando a moverse hacia actividades económicas menos contaminantes, posiblemente gracias a la adopción de tecnologías más limpias, la eficiencia energética o una mayor conciencia ambiental. Este resultado se vincula de manera indirecta con la hipótesis de la CAK, la cual plantea que, a partir de cierto umbral de desarrollo económico, las emisiones tienden a disminuir. Si bien este resultado no permite afirmar la existencia de un punto de inflexión claro, sí sugiere que en algunos territorios podría estar iniciando un proceso de desacoplamiento entre crecimiento y presión ambiental.

La inclusión del parámetro de autocorrelación espacial ( $\lambda$ ) y su significancia validaron el uso del modelo SEM, al demostrar que las emisiones en una región están relacionadas con las condiciones de regiones vecinas. Este hallazgo es relevante tanto desde el punto de vista metodológico como de política pública, ya que refuerza la necesidad de diseñar estrategias de mitigación coordinadas territorialmente. Las políticas ambientales no deben formularse como islas administrativas, sino tomando en cuenta las interacciones entre entidades, particularmente en lo que respecta a flujos de contaminación, movilidad de población, infraestructura compartida y recursos hídricos.

La utilidad del enfoque subnacional y comparativo adoptado en esta investigación radicó en su capacidad para captar patrones divergentes de comportamiento entre las regiones de ambos países. Mientras que en México se observó una mayor heterogeneidad entre entidades con estructuras económicas contrastantes, en Ecuador las emisiones estuvieron fuertemente condicionadas por la concentración de actividades extractivas en determinadas provincias. Esta diferenciación aporta evidencia empírica a los argumentos desarrollados en el marco teórico, que señalan la importancia de incorporar variables contextuales, territoriales e institucionales para evaluar adecuadamente la validez o limitaciones de la CAK en América Latina.

Otra contribución destacable fue la incorporación de variables relacionadas con la gestión ambiental (aguas residuales), usualmente ausentes en modelos centrados exclusivamente en el PIB. La inclusión de esta variable permitió evaluar, al menos de manera indirecta, la capacidad institucional para reducir los impactos del desarrollo económico. En este sentido, se abre una línea de investigación prometedora sobre la necesidad de fortalecer los sistemas de monitoreo ambiental y ampliar la cobertura de servicios públicos esenciales como el saneamiento, especialmente en zonas rurales o con menor capacidad fiscal. Experiencias como las reportadas por Suárez-Venero (2019) demuestran que los sistemas agroforestales, además de funcionar como sector productivo, contribuyen al almacenamiento de carbono y ofrecen alternativas sustentables para mitigar emisiones en contextos rurales.

Aunque el modelo estimado se desarrolló de una manera conjunta para ambos países, se pueden notar ciertas diferencias en el comportamiento de las variables. En el caso de México, la relación entre las variables analizadas y las emisiones parece estar influenciada por una mayor diversidad en la estructura productiva y el nivel de urbanización en las distintas entidades. Por otro lado, en Ecuador, los resultados podrían estar más relacionados con la concentración de actividades económicas en ciertas provincias. Estas diferencias no alteran el patrón general que se ha encontrado, pero sí resalta la importancia de tener en cuenta las particularidades territoriales al interpretar los resultados.

Este trabajo demostró que la incorporación de modelos espaciales no solo mejora la calidad de la estimación estadística, sino que también permite representar con mayor fidelidad la realidad ambiental y económica de los países en desarrollo. El uso de un diseño común para México y Ecuador permitió realizar comparaciones útiles que fortalecen el valor explicativo de los resultados, al tiempo que ponen de manifiesto la necesidad de llevar a cabo análisis regionales más sistemáticos y a largo plazo.

## **Discusión**

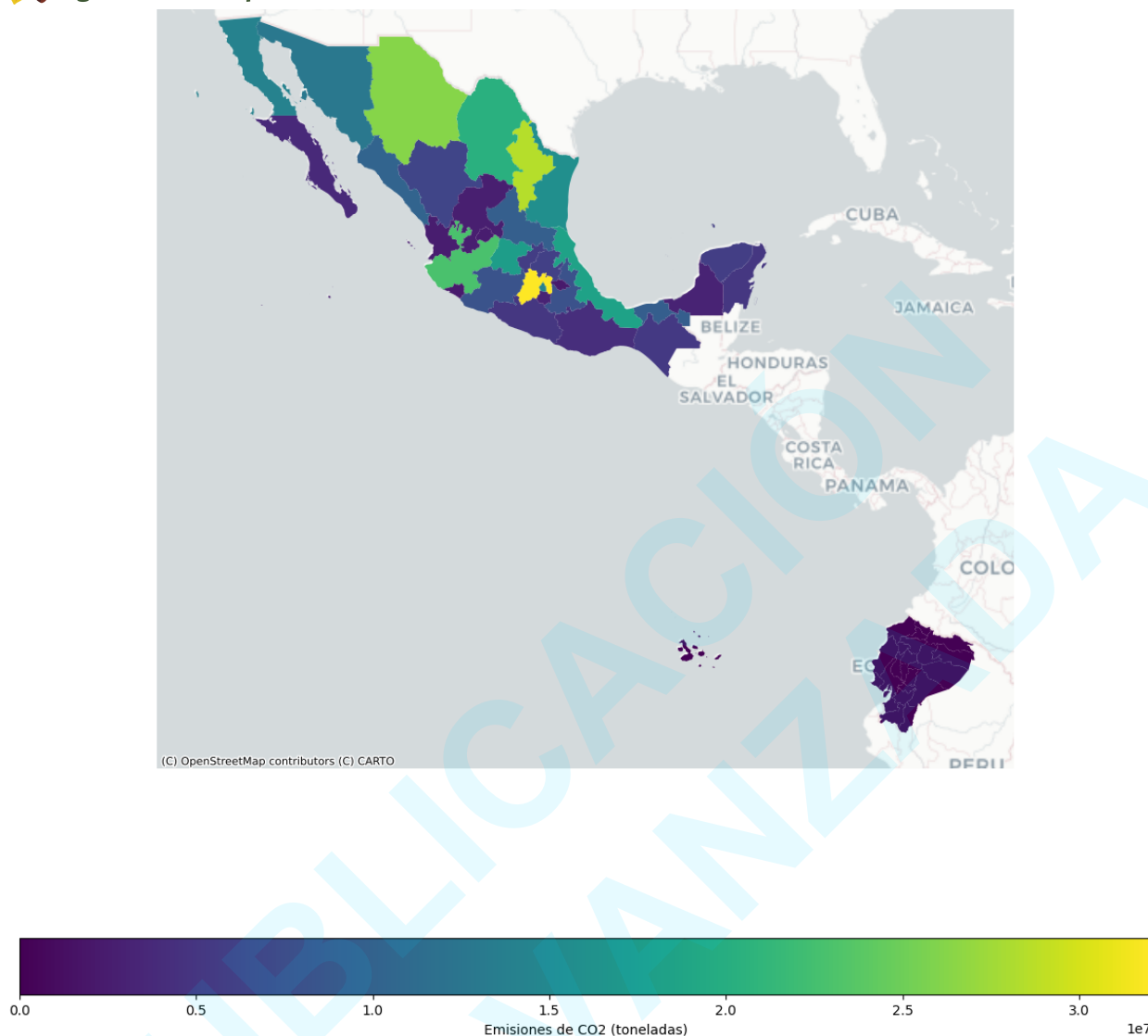
Esta investigación analiza dos países de América Latina: México y Ecuador, que representan ejemplos pertinentes para explorar cómo las trayectorias económicas, institucionales, políticas y ambientales influyen sobre las emisiones de CO<sub>2</sub>. En especial, en contextos de países en vías de desarrollo donde se enfrentan múltiples barreras hacia un desarrollo sostenible.

La selección de unidades subnacionales permitió superar las limitaciones de los análisis agregados. Se analizaron un total de 56 entidades (32 entidades federativas en México y 24 provincias en Ecuador). Esta elección permitió capturar la heterogeneidad territorial interna de ambos países, observando no solo las diferencias nacionales, sino también las dinámicas regionales que condicionan la relación entre crecimiento económico, presión demográfica y emisiones de CO<sub>2</sub>.

La inclusión de una perspectiva territorial y comparada resultó esencial para entender cómo las variables económicas, demográficas y ambientales interactúan bajo marcos institucionales diferentes (Cansino et al., 2019). Asimismo, permitió avanzar en el estudio de la Curva Ambiental de Kuznets (CAK) en contextos específicos de América Latina, donde la desigualdad estructural y la diversidad ecológica hacen necesario un enfoque más desagregado y contextualizado.

Asimismo, se incorporó un mapa con base en las emisiones anuales de CO<sub>2</sub> por entidad, el cual permite visualizar la distribución espacial de esta variable en las regiones analizadas. Este insumo ofrece un primer acercamiento a los patrones territoriales de presión ambiental y refuerza la necesidad de aplicar un enfoque metodológico que contemple la dimensión espacial (Mahmood, 2023).

Como puede observarse en la **Figura 2**, existen marcadas diferencias en la intensidad de las emisiones entre regiones. En el caso mexicano, las entidades con mayor volumen de emisiones corresponden en general a zonas más industrializadas y urbanizadas, mientras que en Ecuador se identifican concentraciones específicas asociadas a provincias con actividad extractiva. Estas observaciones iniciales respaldan el análisis posterior mediante técnicas de econometría espacial.



**Figura 2.** Distribución territorial de las emisiones de CO<sub>2</sub> en México y Ecuador en 2020.

Fuente: Elaboración propia con datos del Ministerio del Ambiente de Ecuador (MAE) y el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RENE) en México. Las emisiones están expresadas en toneladas anuales de CO<sub>2</sub> por entidad subnacional.

Los resultados obtenidos mediante el modelo de error espacial (SEM) confirman que el comportamiento de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en México y Ecuador no puede explicarse únicamente desde la lógica económica convencional. Aunque el PIB presentó un coeficiente negativo y marginalmente significativo, lo que sugiere una posible transición hacia actividades menos contaminantes, este resultado no es suficiente por sí solo para validar

empíricamente la hipótesis de la curva ambiental de Kuznets (CAK). Por el contrario, la influencia robusta y positiva de las variables: logaritmo de la población y volumen de aguas residuales indica que los factores demográficos y de infraestructura tienen un peso considerable en la configuración de las trayectorias ambientales de ambos países, coincidiendo con la evidencia sobre el papel del uso de suelo en la presión ambiental, donde trabajos como el de López-Teloxa et al. (2020) destacan que los suelos agrícolas en el trópico mexicano presentan variaciones en el carbono orgánico asociados a prácticas de manejo, lo que repercute en el balance de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Al contrastar estos resultados con el marco teórico previamente desarrollado, es evidente que las dinámicas observadas coinciden en parte con los estudios que señalan la debilidad empírica de la CAK en América Latina. Por ejemplo, Freire-Noriega (2021), en su análisis para Ecuador, no encuentra evidencia de una relación en forma de U invertida entre PIB y emisiones, lo cual coincide con la magnitud limitada del coeficiente del PIB encontrado en este estudio. De forma similar, un estudio previo realizado por Herrera-Ríos & Terán-Pérez (2024) también confirma este patrón, al mostrar que el crecimiento económico en México sigue asociado a un aumento en las emisiones, aunque con ciertos indicios de desacoplamiento en las regiones más desarrolladas. Dicho resultado coincide con lo planteado por Juárez (2024), quien documenta que esta relación aún no ha alcanzado su punto de inflexión, pero comienza a mostrar señales de transformación progresiva.

Este patrón es particularmente relevante si se considera que el PIB identifica diferencias estructurales en las 56 regiones analizadas en este estudio. En las entidades de México y provincias de Ecuador donde predomina la actividad agrícola o el turismo, el impacto ambiental por unidad de PIB podría ser menor que en zonas con alta presencia de industrias pesadas o generación eléctrica basada en combustibles fósiles. En este sentido, los resultados del presente estudio confirman la advertencia de López-Menéndez et al. (2006) sobre los límites interpretativos del enfoque original de Kuznets cuando se aplica a la relación entre crecimiento y contaminación. De forma similar, en el caso chileno, Castillo-Acevedo (2024) documenta que la relación entre crecimiento económico y contaminación atmosférica presenta variaciones significativas entre regiones, lo que refuerza la necesidad de considerar enfoques desagregados para evaluar la validez de la CAK.

En cambio, las variables demográficas y de gestión ambiental presentaron coeficientes estadísticamente significativos y con signos esperados. El logaritmo de la población mostró un

coeficiente muy elevado y altamente significativo ( $p < 0.01$ ) \*\*, lo que sugiere que las presiones asociadas a la densidad poblacional —como la movilidad urbana, la demanda energética, el consumo de recursos y la generación de residuos— son elementos determinantes en el comportamiento de las emisiones. Este hallazgo es coherente con los resultados de Flores-Xolocotzi (2023), quien identifica una relación de tipo U invertida entre densidad poblacional y áreas verdes, así como con Mosconi et al. (2020), quienes argumentan que los vínculos entre economía y medio ambiente deben ser comprendidos como procesos territoriales complejos.

Asimismo, la variable de aguas residuales generadas, como *proxy* de la capacidad institucional para gestionar los impactos del desarrollo, mostró también una relación positiva significativa ( $p < 0.05$ ) con las emisiones. Esto refuerza la importancia de considerar indicadores de infraestructura y servicios básicos en los modelos ambientales. En contextos como el ecuatoriano, donde las tasas de tratamiento de aguas residuales son bajas en varias provincias, la correlación entre este indicador y las emisiones se vuelve aún más relevante para evaluar el desempeño ambiental. Por su parte, en México, las brechas regionales en acceso al saneamiento también podrían explicar parte de la varianza observada. Estudios previos que emplean modelos de regresión Ridge con validación cruzada (Ridge CV) aplicados al Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) confirman la relevancia de la precipitación y la actividad económica en la salud de la vegetación, demostrando que el análisis de distintos factores ambientales y socioeconómicos resulta esencial para comprender los temas de sostenibilidad (Herrera-Ríos & Soto-Zazueta, 2024)

El valor del parámetro de autocorrelación espacial ( $\lambda = -0.14421$ ;  $P < 0.01$ ), indica la presencia de la dependencia espacial entre las emisiones de CO<sub>2</sub> en una entidad están parcialmente determinadas, por lo que ocurre en las regiones vecinas. Este resultado valida teóricamente el enfoque metodológico adoptado, en línea con estudios como los de Xu et al. (2018) para China y Mosconi et al. (2020) para Europa, que resaltan cómo la contaminación no se distribuye de manera aleatoria ni estrictamente local, sino que responde a dinámicas regionales interdependientes. En el caso de América Latina, esta evidencia es aún más importante dada la fragmentación institucional, las asimetrías en políticas públicas y la falta de mecanismos regionales de cooperación ambiental. Freire-Vinueza, Meneses & Cuesta (2021) califican incluso a la región como un “paraíso de la contaminación ambiental”, destacando que la debilidad institucional y la tolerancia hacia sectores extractivos intensivos agravan los problemas de gobernanza ambiental.

Desde una perspectiva comparada, el hecho de que el modelo haya integrado datos subnacionales tanto de México como de Ecuador ofrece una ventaja significativa respecto a estudios previos que se restringen a un solo país. Como señala Riveros-Gavilanes & Reyes-Vargas (2023), los patrones de comportamiento económico y ambiental son heterogéneos dentro de la región y requieren de modelos que capten dicha diversidad. Este análisis comparativo permite identificar similitudes — como el papel central de la población— pero también diferencias institucionales que podrían explicar por qué en algunos casos el PIB tiene un efecto más atenuado o incluso negativo sobre las emisiones.

Es importante señalar que la gobernanza ambiental y la capacidad institucional, aunque no fueron modeladas directamente en esta versión empírica, subyacen a las variables utilizadas. El volumen de aguas residuales, por ejemplo, no solo refleja hábitos de consumo, sino también la capacidad de las instituciones públicas para proveer servicios de tratamiento, supervisión ambiental y educación ciudadana. Este punto ha sido ampliamente discutido en estudios como los de Hussain et al. (2023) y Wang et al. (2022), quienes encuentran que la calidad de la gobernanza es un predictor clave de las emisiones per cápita.

La mayoría de los estudios de la CAK en América utilizan modelos lineales, como MCO, VAR o datos de panel, este trabajo en cambio aporta al debate metodológico al emplear un modelo SEM, que permite captar las relaciones residuales espaciales y ofrecer estimaciones más precisas. Esto resulta particularmente relevante en países como México y Ecuador, donde la diversidad territorial es alta y las dinámicas ambientales no se ajustan fácilmente a patrones nacionales homogéneos. Por tanto, los resultados obtenidos deben ser interpretados no como validaciones directas de la CAK, sino como evidencia de que dicha hipótesis puede adquirir formas distintas dependiendo del contexto institucional, territorial y demográfico. Mishra (2020) coincide en que la relación entre crecimiento económico y sostenibilidad ambiental debe analizarse a través de enfoques no lineales y multilaterales, que incorporen indicadores de gobernanza, bienestar y capacidad de resiliencia para reflejar la complejidad del desarrollo en economías emergentes. Estos hallazgos tienen implicaciones concretas para el diseño de políticas públicas.

Los resultados obtenidos muestran patrones que son coherentes con la literatura ambiental más reciente y subrayan la importancia de tener en cuenta tanto los factores estructurales como las dinámicas espaciales al analizar las emisiones contaminantes. La notable influencia de las variables

demográficas y de gestión ambiental, junto con la evidencia de dependencia espacial en los residuos, refuerzan la necesidad de utilizar herramientas econométricas que reconozcan la diversidad territorial. Estos hallazgos no solo validan el valor explicativo del modelo SEM en contextos comparativos como los de México y Ecuador, sino que también abren la puerta a la exploración de diferencias institucionales y de políticas públicas como factores adicionales que pueden influir en la variación de las emisiones.

## Conclusiones

El presente artículo confirma la necesidad de aplicar políticas diferenciadas que se adapten a las condiciones estructurales de cada entidad federativa o provincia, en lugar de partir de un diagnóstico nacional promedio. En segundo lugar, refuerza la urgencia de fortalecer la infraestructura de gestión ambiental, especialmente en lo referente al saneamiento y tratamiento de aguas. En tercer lugar, sugieren que, sin una mejora en la planificación urbana y en la gobernanza territorial, los beneficios del crecimiento económico podrían seguir estando acompañados de impactos ambientales negativos, lo que pondría en riesgo la sostenibilidad del desarrollo.

Desde esta perspectiva, el presente estudio no solo aporta evidencia empírica que enriquece el debate sobre la validez de la CAK en América Latina, sino que también contribuye metodológicamente al demostrar la utilidad de incorporar enfoques espaciales y comparativos. De cara a futuras investigaciones, se recomienda incluir indicadores institucionales explícitos, como la calidad de gobierno, la corrupción o las capacidades regulatorias, así como explorar interacciones no lineales entre las variables, lo que permitiría identificar umbrales críticos y posibles puntos de inflexión en la relación entre desarrollo y sostenibilidad.

Se recomienda que futuras investigaciones incorporen variables adicionales, como la calidad institucional, la cobertura forestal, la intensidad energética o el nivel educativo. Del mismo modo,

sería pertinente desarrollar modelos dinámicos o de panel que permitan evaluar la evolución temporal de las emisiones y detectar posibles puntos de inflexión en las trayectorias ambientales. En conjunto, estas mejoras metodológicas contribuirían a generar diagnósticos más sólidos para respaldar decisiones de políticas públicas sostenibles, justas y contextualizadas territorialmente.

Esta diferenciación aporta evidencia empírica a los argumentos desarrollados en el marco teórico, que señalan la importancia de incorporar variables contextuales, territoriales e institucionales para evaluar adecuadamente la validez o limitaciones de la CAK en América Latina.

A partir de los resultados obtenidos, se sugiere avanzar hacia políticas públicas diferenciadas que reconozcan las disparidades estructurales entre entidades federativas y provincias. Un diseño más preciso de los instrumentos ambientales permitiría abordar las causas específicas de las emisiones en cada territorio y evitar soluciones homogéneas que resultan ineficaces o incluso contraproducentes. Por ejemplo, mientras que en algunas regiones sería necesario fomentar las tecnologías limpias para la industria, en otras sería más prioritario ampliar la infraestructura de saneamiento o implementar programas de educación ambiental.

## Referencias

- Afifi, A. (2012). *The environmental Kuznets: F1 or high, middle, and low-income Latin American countries*. Bryant Digital Repository. <https://digitalcommons.bryant.edu/eeb/vol5/iss1/1/>
- Alvarado, L. A. C., Vinuesa, A., y Waldmüller, J. (2024). *Territorio y precarización bajo un contexto de presiones extractivas: El caso de las comunidades Awá Guadualito y La Unión en la provincia de Esmeraldas, Ecuador* [Tesis de maestría]. Facultad Latinoamericana de

<https://repositorio.flacsoandes.edu.ec/items/0040e907-3883-48a1-a751-8b5d53e2db8d>

Alzate-Rodríguez, L. (2022). *Análisis de la deforestación en Colombia desde la curva ambiental de Kuznets* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstreams/f9d428db-4de7-46c3-9aee-d369b7d08c8e/download>

Anselin, L. (1988). *Spatial econometrics: Methods and models*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-7799-1>

Balza, L. H., Yopez, A., & Matías, D. (2024, 18 de julio). *¿Cómo se relacionan las emisiones CO<sub>2</sub> y el crecimiento económico en América Latina y el Caribe?*. Banco Interamericano de Desarrollo (Blog). <https://blogs.iadb.org/energia/es/como-se-relacionan-las-emisiones-co2-y-el-crecimiento-economico-en-america-latina-y-el-caribe/> BID Blog

Cansino, J. M., Román-Collado, R., & Molina, J. C. (2019). Quality of institutions, technological progress, and pollution havens in Latin America: An analysis of the environmental Kuznets curve hypothesis. *Sustainability*, 11(13), 3708. <https://doi.org/10.3390/su11133708>

Castillo-Acevedo, N. F. (2024). *El efecto de largo plazo del crecimiento económico en la contaminación: Evidencia de la curva medioambiental de Kuznets en Chile* [Tesis de maestría]. Universidad de Chile.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. (2022). *Panorama del desarrollo territorial de América Latina y el Caribe 2022*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/48119-panorama-desarrollo-territorial-america-latina-caribe-2022> CEPAL

Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. (2024). *Biodiversidad y desarrollo: reflexiones desde América Latina y el Caribe* (LC/TS.2024/95). Santiago: CEPAL.

- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos [OCDE], Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL] & Banco de Desarrollo de América Latina y el Caribe [CAF]. (2022). *Perspectivas económicas de América Latina 2022: Hacia una transición verde y justa*. OCDE Publishing. <https://doi.org/10.1787/3d5554fc-en> OECD
- Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets curve hypothesis: A survey. *Ecological Economics*, 49(4), 431–455. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.02.011>
- Elenes, J. R. F., Parra, T. A., & Urbano, P. M. (2024). *Industria manufacturera: Cambio estructural, relocalización, avances y rezagos en las regiones de México (1980-2019)*. Universidad Autónoma de Sinaloa.
- Enríquez-Fuenmayor, J. E. (2020, 9 de enero). La curva de Kuznets como medidor de crecimiento y desigualdad para el Ecuador. *Sapientiae*, 1(1), 40–56. <https://publicacionescd.uleam.edu.ec/index.php/sapientiae/article/view/46>
- Flores-Xolocotzi, R. (2023). *Un estudio de desacoplamiento económico y áreas verdes urbanas en 305 municipios mexicanos*. *Decumanus*, 11(11). <https://doi.org/10.20983/decumanus.2023.2.4>
- Freire-Noriega, E. A. (2021). *El crecimiento económico y el impacto ambiental a través de la curva de Kuznets en el Ecuador* [Trabajo de titulación]. Universidad Técnica de Ambato. Repositorio UTA. <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/34112>
- Freire-Vinueza, C., Meneses, K., & Cuesta, G. (2021). América Latina: ¿Un paraíso de la contaminación ambiental?. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(2), 1–18. <http://dx.doi.org/10.15359/rca.55-2.1>
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1991). *Environmental impacts of a North American Free Trade Agreement* (NBER Working Paper No. 3914). National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w3914>
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1995). Economic growth and the environment. *The quarterly journal of economics*, 110(2), 353-377.

- Guevara-Segarra, M. F., Guevara-Segarra, M. G., Quinde-Pineda, A. P., & Guerrero-Vásquez, L. F. (2025). Capital Formation and Oil Consumption Drive CO<sub>2</sub> Emissions in Ecuador: Evidence from an ARDL Model in Log-First Differences. *Sustainability*, 17(17), 7771. <https://doi.org/10.3390/su17177771>
- Herrera Ríos, A. Y., & Terán-Pérez, B. M. (2024). México: Una economía acoplada a su degradación ambiental y sus costos ambientales de 2003 a 2020. *Regiones y Desarrollo Sustentable*, 24(45), 1–20. <https://doi.org/10.63042/ybyrha30>
- Herrera Ríos, A. Y., & Soto Zazueta, I. M. (2024). Análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en México: Implicaciones Ambientales 2021–2023. En *Sustentabilidad en la gestión social de los recursos naturales: prácticas agropecuarias y vulnerabilidad multisectorial*, pp. 23–40. Universidad CESMAG. <https://doi.org/10.15658/CESMAG25.19060104>
- Hussain, I., Ahmad, E., & Majeed, M. T. (2023). Curvature and turning point of the environmental Kuznets curve in a global economy: The role of governance. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(18), 53007–53019. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25835-7>
- Juárez, M. P. (2024). Estimación de la curva de Kuznets ambiental para México, 1974–2020. *Boletín Científico de las Ciencias Económico Administrativas del ICEA*, 13(Especial), 44–56. <https://doi.org/10.29057/icea.v13iEspecial.12084>
- López Menéndez, A. J., Rodríguez, M. A., & Suárez, R. P. (2006). Crecimiento económico y desigualdad: Nuevas extensiones del proceso de Kuznets. *Estudios de Economía Aplicada*, 24(1), 221–244.
- López-Teloxa, C., Monterroso-Rivas, A. I., & Gómez-Díaz, J. D. (2020). Organic carbon in agricultural soils of the Mexican tropics. *Revista de Geografía Agrícola*, (64), 107–117. <https://doi.org/10.5154/r.rga.2020.64.07>
- Mahmood, H. (2023). Trade, FDI, and CO<sub>2</sub> emissions nexus in Latin America: The spatial analysis in testing the pollution have and the EKC hypotheses. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(6), 14439–14454. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23154-x>

- Meza-López, P., Trujillo-Delgado, M. K., Burciaga-Álvarez, A. U., De la Cruz-Carrera, R., & Nájera-Luna, J. A. (2021). Carbon footprint estimate in the primary wood processing industry in El Salto, Durango. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 27(2), 267–283. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.07.060>
- Mishra, M. K. (2020). *The Kuznets curve for the sustainable environment and economic growth* (ESRB Working Paper No. 216734). ZBW – Leibniz Information Centre for Economics. <https://www.econstor.eu/handle/10419/216734>
- Mosconi, E. M., Colantoni, A., Gambella, F., Cudlinová, E., Salvati, L., & Rodrigo-Comino, J. (2020). Revisiting the environmental Kuznets curve: The spatial interaction between economy and territory. *Economies*, 8(3), 74. <https://doi.org/10.3390/economies8030074>
- Muñoz Ramos, T., & Osorio Caballero, M. I. (2023). Prueba de la curva ambiental de Kuznets: El papel de las instituciones y la complejidad económica en países de América Latina. *Economía Informa*, (443), 19–29. <http://www.economia.unam.mx/assets/pdfs/econinfo/443/02TaniaMunoz.pdf>
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos [OCDE]. (2023). *Environment at a Glance in Latin America and the Caribbean: Spotlight on Climate Change*. OECD Publishing.
- Riveros-Gavilanes, J. M., & Reyes-Vargas, A. M. (2023a). CO2 Pollution and Economic Growth: Heterogeneous Behavior for Latin America? *Sociedad y Economía*, 48, e10612013. <https://doi.org/10.25100/sye.v0i48.12013>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2022). *Informe de la situación del medio ambiente en México 2022*. <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/index.html>
- Suárez-Venero, G. M. (2019). Tree diversity and stored carbon in cocoa agroforestry systems. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 25(1), 1–15. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.11.065>

- Terán-Pérez, B. M., Herrera Ríos, A. Y., & Becerra Pérez, L. A. (2025). Perspectives on the environmental Kuznets curve in America: A static panel approach for the period 2010–2020. *Vértice Universitario*, 27(96), e206. <https://doi.org/10.36792/rvu.v27i96.206>
- Wang, Y., Liu, M., Wang, S., Cui, X., Hao, L., & Gen, H. (2022). Assessing the impact of governance and health expenditures on carbon emissions in China: Role of environmental regulation. *Frontiers in Public Health*, 10, 949729. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.949729>
- Xu, H., Zhang, C., Li, W., Zhang, W., & Yin, H. (2018). Economic growth and carbon emission in China: A spatial econometric Kuznets curve? *Zbornik Radova Ekonomskog Fakulteta u Rijeci*, 36(1), 11–28. <https://doi.org/10.18045/zbefri.2018.1.11>