

► Economic development and environment. An analysis of global deforestation in the 1990-2020 period

Desarrollo económico y medioambiente



Un análisis de la deforestación global en el periodo 1990-2020

Por:  Martín Alfonso López Ramírez · César Vázquez González · César Columna Franco



López Ramírez, M. A., Vázquez González, C. y Columna Franco, C. (2024). Desarrollo económico y medioambiente.

Un análisis de la deforestación global en el periodo 1990-2020. *Entorno UDLAP*, 22

 **Recibido:** 5 de septiembre de 2023  **Aceptado:** 19 de febrero de 2024

► Economic development and environment. An analysis of global deforestation in the 1990-2020 period

Desarrollo económico y medioambiente



Un análisis de la deforestación global en el periodo 1990-2020

Por:  Martín Alfonso López Ramírez · César Vázquez González · César Columna Franco



López Ramírez, M. A., Vázquez González, C. y Columna Franco, C. (2024). Desarrollo económico y medioambiente.

Un análisis de la deforestación global en el periodo 1990-2020. *Entorno UDLAP*, 22

 **Recibido:** 5 de septiembre de 2023  **Aceptado:** 19 de febrero de 2024

RESUMEN

Debido a las limitaciones ecológicas existentes, comprender el efecto del desarrollo económico sobre el ambiente es importante en la actualidad. En este sentido, la curva ambiental de Kuznets y la transición forestal plantean explicaciones complementarias a la deforestación, la cual supone uno de los retos más importantes por sus implicaciones ecológicas, económicas y sociales. Mediante la ciencia de datos, se evaluó la relación entre el ingreso per cápita y la tasa de deforestación para las regiones de países consideradas por el Banco Mundial en el periodo 1990-2020. Los resultados sugieren que las observaciones son parcialmente consistentes con las hipótesis mencionadas: la mayoría de las regiones del mundo se caracterizan por una desaceleración de las tasas de deforestación conforme se desarrollan. Sin embargo, también se encontraron inconsistencias importantes, por lo que más investigaciones son necesarias para una mejor comprensión de los factores de la dinámica de uso del suelo.

PALABRAS CLAVE

Curva ambiental de Kuznets · Transición forestal · Cambio de uso del suelo

ABSTRACT

Due to ecological thresholds, understanding the effect of economic development on the environment is an important task. Kuznets Environmental Curve and Forest Transition propose complementary explanations to phenomenon of deforestation, which is one of the most important challenges due to its ecological, economic and social implications. Using data science, the relation between per capita income and deforestation rate was assessed for the regions of countries considered by the World Bank in the period 1990-2020. The results suggest that the observations are partially con-

sistent with the aforementioned hypotheses: most regions of the world are characterized by a deceleration of deforestation rates, as they develop. However, important inconsistencies were also found. Thus, more research is needed for a better understanding of the determinants of land use dynamics.

KEYWORDS

Environmental Kuznets Curve · Forest Transition · Land use change

INTRODUCCIÓN

El desarrollo económico es el proceso mediante el cual se expanden las capacidades productivas de los habitantes de una región (Hill, 2023); por esta razón, es fundamental para el desarrollo de nuevos mercados, lo que en última instancia incide en el bienestar social ya que, entre otros factores, permite la distribución «eficiente de los recursos» entre productores, distribuidores y consumidores. Aunque existen varios indicadores, tales como el índice de desarrollo humano o el ahorro neto ajustado, el ingreso o producto interno bruto (PIB) per cápita —que representa el ingreso promedio de un habitante de un país o una región— es el más utilizado debido a que permite comparar los sectores, ramas y actividades de la economía tanto al interior de los países como con sus contrapartes.

Actualmente, los efectos que el desarrollo económico tiene sobre el ambiente son de suma importancia, ya que éstos tienen implicaciones significativas sobre la consecución de los objetivos económicos, sociales y climáticos planteados en los Objetivos de Desarrollo Sostenible debido al costo de oportunidad que existe entre éstos. Por ejemplo, el objetivo 2: hambre cero, enfatiza la necesidad del combate a la malnutrición y a la eliminación de la falta de acceso a los alimentos básicos; sin embargo, estudios como los de Fukase y Martin (2020) y

Edmonds *et al.* (2017) señalaron las implicaciones que puede tener la reducción del hambre a través de la ampliación de la frontera agrícola y su impacto sobre los ecosistemas. Más importante, la existencia de la vida *per se* como la conocemos se traduce en una constante transacción de costos y beneficios entre los Objetivos de Desarrollo Sostenible con enfoque antropocéntrico y los que tienen un énfasis ecológico.

Desde una perspectiva económica, una hipótesis que trata de responder a la interrogante del efecto del desarrollo económico sobre el ambiente es la llamada *curva ambiental de Kuznets* (curva de Kuznets a partir de ahora), concepto acuñado por Grossman y Krueger (1991) en la década de los noventa, el cual se inspiró en las aportaciones macroeconómicas del economista Simon Kuznets acerca del desarrollo y la desigualdad (Caravaggio, 2020). La curva de Kuznets sostiene que, en una fase inicial del desarrollo, el ambiente se deteriora como consecuencia del consumo de los recursos naturales para obtener un progreso económico y social. Sin embargo, al alcanzar cierto umbral de desarrollo, el deterioro del ambiente comienza a disminuir. Es decir, la relación entre desarrollo y ambiente sigue una forma de «U» invertida (Caravaggio, 2020). Por ejemplo, en el caso de las emisiones de gases de efecto invernadero, si la curva de Kuznets se sostiene, se espera que, cuando el ingreso per cápita es bajo y este comienza a incrementarse, *ceteris paribus* lo harán también las emisiones per cápita. No obstante, cuando el ingreso per cápita alcanza cierto nivel —el umbral de desarrollo—, las emisiones per cápita comenzarán a reducirse paulatinamente. Este razonamiento ha llevado, en parte, al debate internacional entre las economías desarrolladas y las emergentes, ya que los países emergentes reclaman la posibilidad de consumir los recursos naturales necesarios, tal y como lo hicieron los países del bloque desarrollado en la búsqueda del umbral de desarrollo.

En el caso de los recursos naturales renovables, como los bosques y las selvas, la relación entre el desarrollo económico y el medioambiente suele ser más compleja. Debido a la posibilidad de regeneración, la cobertura forestal puede reestablecerse y expandirse. Sin embargo, como consecuencia de la deforestación, esta también puede contraerse. De hecho, mientras que en los países en vías de desarrollo las tasas de deforestación son altas, en los países desarrollados las tasas de deforestación tienden a desacelerarse e, inclusive, cambia la dinámica de uso del suelo. Es decir, de una dinámica de deforestación o contracción de la co-

bertura forestal se pasa a un proceso de reforestación o recuperación de la cobertura forestal (Pendrill *et al.*, 2019). La dinámica antes descrita se conoce como transición forestal, un concepto acuñado por el geógrafo Alexander Mather en la década de los 90 (Mather, 1992). Para la sistematización de su estudio, la transición forestal se divide en cuatro fases: la pretransición, la transición temprana, la transición tardía y la postransición. En la pretransición, la cobertura forestal es estable a un nivel alto; durante la transición temprana, la cobertura forestal disminuye; en la transición tardía, la pérdida de cobertura forestal continúa, pero a un ritmo menor, finalmente, en la postransición, la cobertura forestal aumenta hasta alcanzar un nuevo estado estacionario (Hosonuma *et al.*, 2012).

En el caso de la deforestación, la curva de Kuznets y la transición forestal pueden ser vistas como dos hipótesis o explicaciones complementarias, ya que la transición forestal hace referencia al comportamiento esperado de una variable de estado —en este caso, la cobertura forestal— y, paralelamente, la curva de Kuznets hace referencia a la razón de cambio de dicha variable (o una variable de flujo) —la tasa de deforestación—. Como resultado, y bajo el supuesto de que el desarrollo económico es sostenido a través del tiempo, la aceleración de la deforestación en etapas tempranas de desarrollo y su posterior desaceleración corresponderán a un comportamiento esperado de la tasa de deforestación en las primeras tres etapas de la transición forestal. Adicionalmente, la transición forestal indica que, en niveles altos de desarrollo, la cubierta forestal invierte su dinámica de contracción, por una de expansión. Lo que equivale a una inversión en el signo y un posterior regreso a cero de la tasa de deforestación. Es decir, la transición forestal propone que la relación entre desarrollo y deforestación sigue una forma de «N». Cabe señalar que la etapa de postransición no se contempla en la curva de Kuznets, debido a que esta etapa es aplicable solo a recursos renovables, como los bosques y las selvas.

Como resultado, la curva de Kuznets y la transición forestal son hipótesis del posible comportamiento de uso del suelo. Sin embargo, ¿a qué grado las hipótesis expuestas se ajustan a la realidad? En las secciones siguientes se analiza desde una perspectiva empírica (utilizando datos) el grado de ajuste de las hipótesis descritas a lo observado en la realidad. En particular, se utilizó información estadística en las escalas nacional y global en el periodo 1990-2000 sobre la superficie forestal y el grado de de-

La transición forestal se divide en cuatro fases:

1

En la pretransición, la cobertura forestal es estable a un nivel alto.

2

Durante la transición temprana, la cobertura forestal disminuye.

3

En la transición tardía, la pérdida de cobertura forestal continúa, pero a un ritmo menor.

4

Finalmente, en la postransición, la cobertura forestal aumenta hasta alcanzar un nuevo estado estacionario.

sarrollo de los países, con la finalidad de analizar la relación entre ambas variables en una escala regional. El objetivo planteado fue inferir hasta qué grado las hipótesis descritas se ajustan al comportamiento observado. Lo anterior se realizó mediante un modelo de regresión con efectos mixtos.

DESARROLLO DEL TEMA

Revisión de literatura

Existe un cuerpo vasto de literatura sobre el análisis de la curva de Kuznets en el contexto de la deforestación y la transición forestal con resultados no concluyentes. La literatura basada en información estadística de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, por sus siglas en inglés) se caracteriza por encontrar soporte empírico de la curva ambiental de Kuznets (Caravaggio, 2020); no obstante, el horizonte temporal de dichos análisis es menor a 30 años, lo que es poco tiempo para un recurso renovable como los bosques. Además, la definición de bosque de la FAO (se detalla en la siguiente sección) es criticable en algunos aspectos.

Otra rama de estudios, basada en información estadística de distintas fuentes (e. g., imágenes satelitales), sugiere resultados mixtos, ya que en algunos casos no se encontró evidencia de la existencia de la relación planteada por la curva ambiental de Kuznets o la transición forestal y en otros casos, sobre todo los relacionados con países o regiones específicos, se encuentra soporte de dicha relación (Barbier et al., 2017; Caravaggio, 2020). Es decir, la literatura ofrece un panorama abierto en cuanto al so-

porte de las hipótesis analizadas. Esta segunda rama de la literatura no está exenta de críticas, ya que los horizontes temporales para los que se cuenta con información son inclusive menores y los métodos para definir la superficie forestal también están sujetos a críticas importantes.

Los estudios previos, no obstante, se han enfocado en las economías en desarrollo, por lo que generalmente las economías desarrolladas quedan fuera del análisis. Además, existen pocos estudios que provean una comparativa global; de esta forma, el estudio aquí presentado intenta abordar dichas limitantes.

Fuentes de información

La tabla 1 indica las fuentes de información consultadas para la obtención de los datos estadísticos necesarios para evaluar las hipótesis planteadas. Para tal fin, fue preciso comparar las tasas de deforestación contra un indicador de desarrollo. Como indicador de desarrollo se utilizó el PIB per cápita con paridad del poder adquisitivo, el cual equivale al ingreso promedio por persona en un país determinado. Debido a la detección de patrones regionales, se incluyó en el presente análisis la región a la que pertenece un país con base en la regionalización utilizada por el Banco Mundial.

Para calcular la tasa de deforestación por país, se utilizó la superficie forestal, la cual se entiende como un uso de suelo con las siguientes características: i) extensiones de tierra mayores a 0.5 hectáreas; ii) árboles con más de cinco metros de altura, y iii) un dosel superior al 10 por ciento (FAOSTAT, 2023). La superficie forestal por país se consultó en la base de datos

Tabla 1. Variables utilizadas para el ajuste del modelo de regresión, se especifican propiedades estadísticas y fuentes de la información.

Variable	Tipo de variable	Unidades	Transformación	Referencia
Tasa de deforestación (<i>td</i>)	Continua	Porcentaje	Cambio porcentual de superficie forestal	Banco Mundial
PIB per cápita (<i>pib</i>)	Continua	Dólares internacionales de 2017 (en miles)	Ninguna	Banco Mundial
Región (<i>reg</i>)	Categoría	Siete regiones	Ninguna	Banco Mundial

Fuente: elaboración propia con información del Banco Mundial.

abiertos del Banco Mundial (World Bank, 2023). Dicha información se encuentra disponible para el periodo 1990-2020 y se reporta en kilómetros cuadrados.

Una vez obtenida la superficie forestal, la tasa de deforestación se calculó como el cambio porcentual de la superficie forestal de un año a otro:

ECUACIÓN [1]

$$\Delta\%f_t = \frac{f_t - f_{t-1}}{f_{t-1}} * 100$$

Donde Δ se lee como el cambio, f representa la cobertura forestal y t es el índice temporal. La ecuación 1 se realizó dentro del *software* estadístico, ya que corresponde a cálculos propios. Cabe señalar que se pierde una observación por cada país; por esta razón, la tasa de deforestación cubre el periodo 1991-2020. Con la finalidad de homogeneizar la presentación de los resultados con la literatura, se invirtió el signo del resultado. De modo que un número positivo indica la pérdida de la cobertura forestal (tasa de deforestación); inversamente, un número negativo indica un incremento de la cobertura forestal (tasa de reforestación).

El PIB per cápita con paridad de poder adquisitivo se consultó en la base de datos abiertos del Banco Mundial (World Bank, 2023). Dicha variable se reporta en dólares internacionales de 2017. Más importante, la paridad de poder adquisitivo asegura que, dada la variabilidad entre niveles de precios, el ingreso entre países sea comparable. Un dólar internacional es una moneda ficticia que equipara el poder de compra de un dólar en Estados Unidos con el resto del mundo.

La región corresponde a la regionalización del Banco Mundial, la cual divide al mundo en siete regiones: Asia Oriental y el Pacífico, Asia Meridional, América Latina y el Caribe, América del Norte, Europa y Asia Central, Oriente Medio y Norte de África y África.

La descarga y manipulación de los datos se realizó utilizando el *software* R, versión 4.3.1. (R Core Team, 2023). La superficie forestal, PIB per cápita y región se descargaron utilizando el paquete *WDI* (Arel-Bundock, 2022), el cual permite la descarga de información de mane-

ra directa de la base de datos mencionada al *software*.

La agregación de la información estadística a nivel región obedeció a la detección de patrones en el nivel mencionado. En específico, la tasa de deforestación y el ingreso per cápita promedio se calcularon de manera anualizada para cada una de las siete regiones, con base en el promedio obtenido en cada caso. Es importante señalar que, debido a la presencia de datos atípicos, el promedio de la tasa de deforestación se calculó mediante un promedio truncado, por lo que se cortó el 15% de las observaciones más extremas (i. e. mínimos y máximos). El proceso anterior se realizó con el paquete *dplyr* (Wickham et al., 2023). El resultado de dicho proceso arrojó una matriz de datos con 210 observaciones que muestran la información estadística sobre la tasa de deforestación promedio anual y el ingreso per cápita promedio anual para cada una de las siete regiones en el periodo 1991-2020.

Análisis exploratorio de datos

La figura 1 muestra la relación entre la deforestación anual promedio y el PIB per cápita promedio por región. En este caso, las observaciones empíricas son parcialmente consistentes con las hipótesis planteadas, ya que se muestra una relación entre el grado de desarrollo económico y la magnitud de la tasa de deforestación y su tendencia. En particular, en los niveles de desarrollo bajo (por ejemplo, en el caso de las regiones de África, y América Latina y el Caribe), al aumentar el grado de desarrollo económico de bajo a medio, la deforestación se desacelera hasta el punto de ser cercana a cero (región de Asia Oriental y el Pacífico). Para regiones con un desarrollo económico alto (Europa, Asia Central, Oriente Medio y Norte de África), la tasa de cambio no solo invierte su signo (cambio en la dinámica de deforestación a reforestación), sino también al aumentar el desarrollo económico, la tasa de reforestación se aproxima a cero, tal y como ocurre en regiones con desarrollo muy alto (América del Norte).

El comportamiento observado es consistente con la segunda etapa de transición, segunda parte de la curva de Kuznets —cuando se ha cruzado el umbral de desarrollo y los incrementos en el nivel de desarrollo están asociados con una desaceleración de la tasa de deforestación—. De manera similar, el comportamiento de la tasa de



EN LOS NIVELES DE DESARROLLO BAJO (POR EJEMPLO, EN EL CASO DE LA REGIÓN DE ÁFRICA Y AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE), AL AUMENTAR EL GRADO DE DESARROLLO ECONÓMICO DE BAJO A MEDIO, LA DEFORESTACIÓN SE DESACELERA HASTA EL PUNTO DE SER CERCANA A CERO.

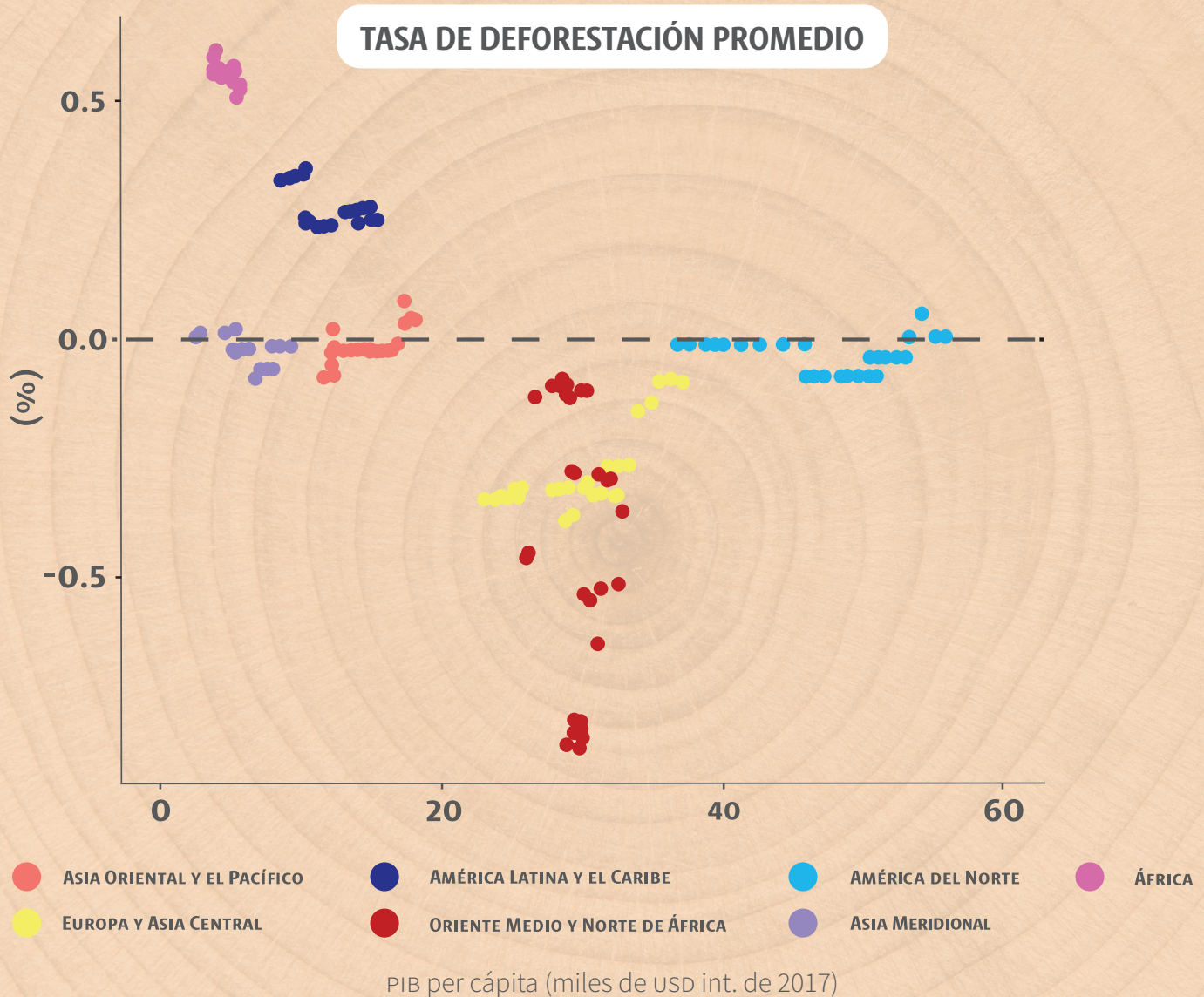


Figura 1. Relación entre el PIB per cápita promedio y la tasa de deforestación promedio por región.
Fuente: elaboración y cálculos propios con información del Banco Mundial.

deforestación es consistente con las etapas de la transición tardía y postransición forestal. Sin embargo, hay regiones que no se ajustan al patrón descrito. Por ejemplo, con un nivel comparable de desarrollo a la región de África o América Latina, la región de Asia Meridional no se encuentra en una dinámica de deforestación, esto podría indicar que no existe un único umbral de desarrollo para el cual las hipótesis analizadas alcanzan las dinámicas predichas, por lo que la posibilidad de variaciones regionales se encuentra abierta. De esta forma, es necesario integrar información al modelo que permita encontrar las probables causas que subyacen a las diferencias significativas entre regiones.

Hasta este punto, el análisis se ha realizado de manera gráfica, en la siguiente sección se realiza un tratamiento inferencial de los datos para analizar si las observaciones tienen un soporte formal.

Modelo de regresión

El análisis visual permitió identificar que la relación entre el nivel de desarrollo y la tasa de deforestación no es lineal. De hecho, el análisis gráfico sugiere una relación polinomial, particularmente cuadrática, ya que la relación entre la tasa de deforestación y el indicador de desarrollo es negativa para niveles de desarrollo bajo y positiva para niveles de desarrollo alto. Además,

se observó que existen variaciones regionales. En este sentido, el modelo de efectos mixtos se ajusta a tales hallazgos debido a que consta de efectos fijos y aleatorios. El primer tipo de efecto describe a la población en general, es decir, es válido para todas las regiones. El segundo tipo de efecto es aplicable para un grupo en particular, lo cual equivale a una región en el caso aquí presentado.

Formalmente se ajustó el siguiente modelo:

ECUACIÓN
[2]

$$td_{it} = \beta_0 + b_0reg_i + \beta_1pib_{it} + b_1pib_{it} + \beta_2pib_{it}^2$$

DONDE

td

es la tasa de deforestación

reg

es la región

pib

es el PIB per cápita

β_j

son los efectos fijos

b_j

son los efectos aleatorios

i

es el índice regional

t

es el índice temporal

El modelo indica que tanto el intercepto como el efecto lineal del desarrollo sobre la tasa de deforestación depende de la región y el ni-

vel de desarrollo de esta. Sin embargo, el efecto cuadrático se estima únicamente de manera global, es decir, como un efecto fijo, ya que los datos no reflejan este tipo de dinámica para las regiones a nivel individual.

El modelo estadístico indicado en la ecuación (2) se ajustó utilizando el paquete *lme4* (Bates *et al.*, 2015), el cual estima los coeficientes mediante el método de máxima verosimilitud restringida.

DISCUSIÓN

La figura 2 muestra el ajuste del modelo y su proyección en el rango de ingresos de 0 a 60,000 dólares per cápita en términos globales y para cada región. La imagen identifica, en los casos en los que fue posible, el umbral de desarrollo de acuerdo con la curva de Kuznets (+), el cambio de dinámica de uso de suelo (X) y la culminación de la transición forestal (*). Como se aprecia, el modelo identificó una transición forestal a nivel global; sin embargo, las tendencias de cambio de uso del suelo difieren entre regiones.

El umbral de la curva de Kuznets se aproximó mediante el ajuste del modelo y el ingreso per cápita mínimo observado cuando se trató de un segmento decreciente de la curva de deforestación ajustada. Cabe señalar que no fue posible determinar el umbral en cuestión de manera analítica debido a que el coeficiente cuadrático es positivo, por lo que las trayectorias de deforestación estimadas están caracterizadas por una trayectoria inicial decreciente y posteriormente creciente y el umbral de la curva de Kuznets requiere lo opuesto. Las raíces de la ecuación cuadrática, es decir, el punto en donde la curva corta el eje horizontal, corresponden al cambio de dinámica de uso del suelo y culminación de la transición forestal. Dichas raíces fueron calculadas utilizando los coeficientes estimados.

A nivel global, el ajuste del modelo es parcialmente consistente con la curva de Kuznets y la transición forestal. En particular, se observa que para ingresos menores a 17,700 dólares, la tasa de deforestación tiende a desacelerarse. Al alcanzar el nivel de ingresos mencionado, la dinámica de uso del suelo cambia a un proceso de reforestación, el cual se espera que se detenga al alcanzar 59,500 dólares de ingreso per cápita. Lo anterior es compatible con el comportamiento esperado de la curva de Kuznets una vez superado el umbral de desarrollo, el cual fue aproximado en 2,300 dólares. De manera similar, el comportamiento global es compatible con las etapas de transición tardía y postransi-

TASA DE DEFORESTACIÓN

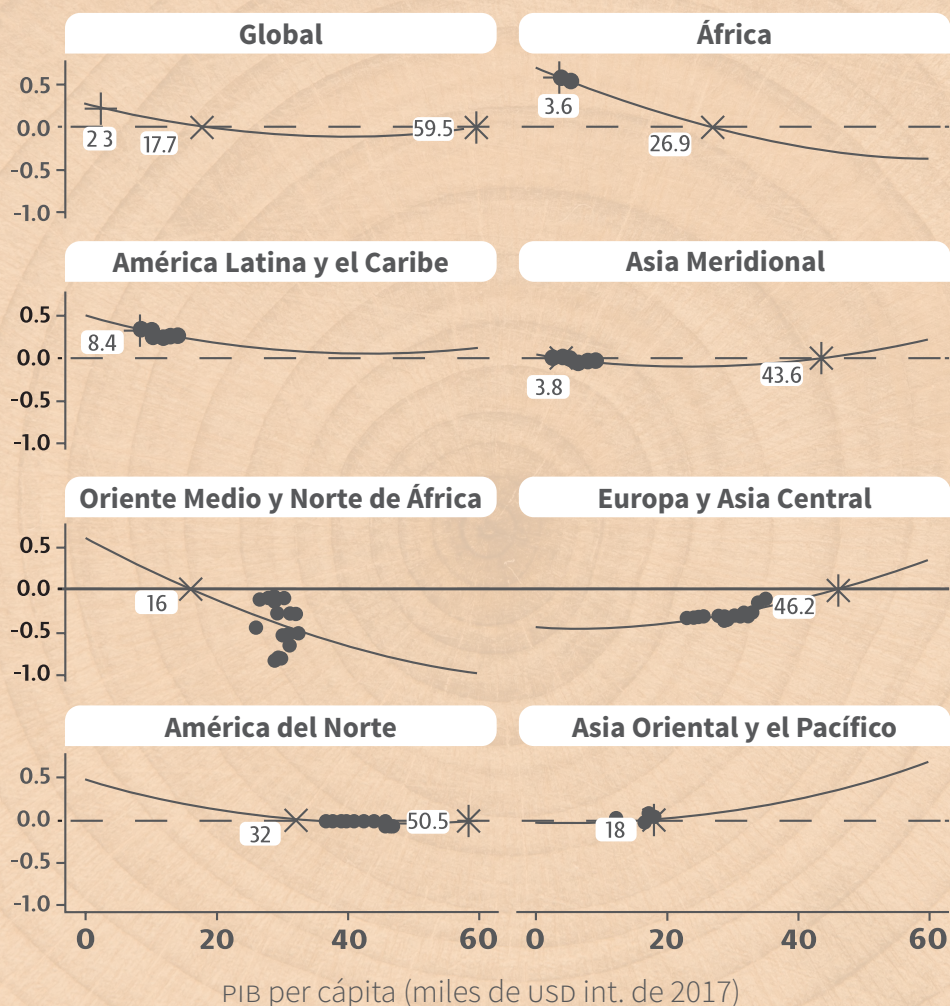


Figura 2. Ajuste del modelo y proyección del comportamiento esperado por región. Se muestran el umbral de desarrollo de la curva de Kuznets (+), el cambio de dinámica de uso de suelo (X) y la culminación de la transición forestal (*), en las regiones en las cuales dichos cálculos fueron posibles. **Fuente:** elaboración y cálculos propios con información del Banco Mundial.

ción, lo que equivale a la desaceleración de las tasas de deforestación, inversión en la dinámica de uso del suelo y el inicio de un proceso de reforestación. Esto sostiene la idea de la persistencia del debate entre los países acerca del derecho que tienen los países emergentes de asumir los costos ambientales por la deforestación con la finalidad de aumentar el nivel de desarrollo económico.

En el caso de las regiones de África, y América Latina y el Caribe, el modelo indica que se ha superado el umbral de desarrollo de la curva de Kuznets (estimado en 3,600 y 8,400 dólares, respectivamente); entonces, se espera una desaceleración de la tasa de deforestación con-

forme dichas regiones se desarrollan. En el caso de la región de África, el modelo permitió estimar que el proceso de deforestación continuará hasta que se alcance un ingreso per cápita de 27,000 dólares. Para el caso de América Latina, tal cálculo no fue posible, ya que la curva estimada no cruza el eje horizontal. Sin embargo, es posible inferir que el ingreso requerido para detener la deforestación es mayor que el observado en la actualidad, por lo que se espera que en ambas regiones la deforestación continúe.

El comportamiento esperado de la deforestación en ambas regiones es compatible con la segunda etapa de la curva de Kuznets y la etapa de transición tardía de la transición forestal;



LOS RESULTADOS SUGIEREN QUE LA MAYORÍA DE LAS REGIONES DEL MUNDO SE ENCUENTRAN EN LAS ETAPAS DE TRANSICIÓN TARDÍA Y POSTRANSICIÓN, ESTO SUPONE UNA DESACELERACIÓN DE LAS TASAS DE DEFORESTACIÓN Y UN CAMBIO EN LA DINÁMICA DE USO DE SUELO, LO QUE IMPLICA UNA EXPANSIÓN DE LA COBERTURA FORESTAL.

es decir, que los incrementos en el PIB per cápita están asociados a una desaceleración de la tasa de deforestación. Lo anterior es consistente con el cuerpo de la literatura que soporta la existencia de la curva de Kuznets y la transición forestal (Caravaggio, 2020). De manera similar, los resultados obtenidos son consistentes con las estimaciones de Culas (2012), quien indicó que en América Latina y África el ingreso necesario para revertir la deforestación todavía no ha sido alcanzado.

De acuerdo al modelo de regresión, las regiones de Asia Meridional, Oriente Medio y Norte de África, así como la región de Europa y Asia Central, se encuentran en una fase de transición tardía; lo que equivale a que las tasas de deforestación en dichas regiones son cero o negativas, es decir, que la cobertura forestal se mantiene estable o en expansión. Cabe destacar que el ingreso estimado para lograr el cambio en la dinámica de uso del suelo es distinto en las regiones. Por ejemplo, en la región de Asia Meridional un ingreso de 3,800 dólares es necesario para observar el cambio antes mencionado. No obstante, en la región de Oriente Medio y Norte de África se necesita un ingreso de 16,000 dólares para observar el cambio en la dinámica de uso de suelo. En la región de Europa y Asia Central, no fue posible calcular dicho umbral. De manera similar, en las regiones en cuestión se espera que la transición forestal concluya con un ingreso ligeramente superior a los 40,000 dólares.

La región de América del Norte, de acuerdo con el modelo, se encuentra cercana a la culminación del proceso de transición forestal. En la región en cuestión se estimó que el proceso de reforestación se inicia una vez que se ha alcanzado un ingreso de 32,000 dólares y se espera que concluya una vez que se ha alcanzado un ingreso de 58,500 dólares.

Finalmente, en las regiones de Asia Oriental y el Pacífico se presentó un comportamiento atípico, ya que, con base en el modelo ajustado, se espera que el proceso de transición forestal culmine cuando alcance los 18,000 dólares, una cifra, además, muy cercana al ingreso observado en la actualidad.

Una vez más, los resultados obtenidos para el resto de las regiones indican la presencia de una transición forestal en una etapa de postransición, es decir, que la dinámica forestal sigue una trayectoria expansiva o estable después de

una recuperación de superficie. Esto coincide con lo teóricamente expuesto en la literatura revisada en el presente análisis, la cual sugiere la existencia de una transición forestal en economías desarrolladas y en algunas economías en desarrollo (Caravaggio, 2020; Hosonuma *et al.*, 2012). De manera similar, el comportamiento de Asia es consistente con las estimaciones de Culas (2012), quien indicó que el nivel de desarrollo permitió el cambio de la dinámica de superficie forestal.

Es importante señalar, sin embargo, que las restricciones impuestas al modelo, en particular la forma funcional cuadrática, impiden capturar algunas de las dinámicas regionales con mayor precisión. Por ejemplo, en el caso de la región de América del Norte o Europa y Asia Central, no se refleja la curva de Kuznets ni la transición forestal en el rango de ingresos menor al de las observaciones actuales. De manera similar, en algunas regiones no fue posible determinar los umbrales de desarrollo para el cambio en la dinámica de uso del suelo. Lo anterior se debe a que los resultados son negativos o las raíces no son reales (*i. e.* la solución requiere números imaginarios). Dicha situación indica que aún existen interrogantes sobre el efecto del desarrollo en el ambiente, por lo que una investigación más exhaustiva es necesaria para abordar tales brechas de conocimiento.

◆◆ CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó el efecto del desarrollo económico sobre el ambiente en el contexto de la deforestación. En particular, se evaluó la relación entre el ingreso per cápita (con paridad de poder adquisitivo) y la tasa de deforestación para las siete regiones de países consideradas por el Banco Mundial en el periodo 1990-2020. Lo anterior con el objetivo de evaluar a qué grado el comportamiento de la tasa de deforestación se ajusta a la curva ambiental de Kuznets y la transición forestal. Por esta razón, es necesario ahondar en las causas subyacentes que podrían influir en un comportamiento diferente a lo teóricamente expuesto por la curva de Kuznets.

A nivel global, las observaciones son parcialmente consistentes con las hipótesis mencionadas; específicamente, en una etapa avanzada de desarrollo con respecto a la curva de Kuznets, en donde los incrementos del desarrollo están asociados a una desaceleración de la de-

forestación. Más importante, los resultados sugieren que la mayoría de las regiones del mundo se encuentran en las etapas de transición tardía y postransición, esto supone una desaceleración de las tasas de deforestación y un cambio en la dinámica de uso de suelo, lo que implica una expansión de la cobertura forestal.

Sin embargo, también se observaron puntos críticos en los resultados obtenidos. Por ejemplo, fuera del rango de ingresos observado, las estimaciones no reflejan el comportamiento esperado por parte de la curva de Kuznets y la transición forestal, por lo que una investigación más exhaustiva y a distintas escalas es necesaria para incrementar la confiabilidad de los resultados aquí expuestos.



Martín López Ramírez

Doctor en Economía por la Universidad de Varsovia. Sus intereses de investigación se centran en el uso de la ciencia de datos para el análisis de problemas económicos y ambientales. Actualmente se

desempeña como profesor de tiempo completo en el Departamento de Economía de la UDLAP.

martin.lopez@udlap.mx



César Vázquez González

Estudió Economía en la Universidad Veracruzana, cursó la especialidad y la maestría en Ciencias en la Universidad Autónoma de Baja California

y el doctorado en Ecología en la Universidad Veracruzana. Actualmente, es candidato a investigador nacional-SNII y profesor - investigador adscrito al Instituto Tecnológico Superior de Jesús Carranza. Además, cuenta con seis publicaciones internacionales en revistas con FI > 3.0 y Q1.

cesargonzalez84@gmail.com



César Columna Franco

Es maestro en Economía y especialista en Métodos Estadísticos por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) y la Universidad

Veracruzana (UV), respectivamente. Sus intereses son la economía aplicada, la estadística y la ciencia de datos; en los últimos años, se ha desempeñado como consultor en la Coordinación de Pronósticos en la empresa Cal y Mayor.

cesar.columna@gmail.com

REFERENCIAS

- Arel-Bundock, V. (2022). *World Development Indicators and Other World Bank Data. R package version 2.7.8 (2.7.8)* [R].
- Barbier, E. B., Delacote, P. y Wolfersberger, J. (2017). The economic analysis of the forest transition: A review. *Journal of Forest Economics*, 27, 10-17. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2017.02.003>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. y Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67, 1-48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Caravaggio, N. (2020). Economic growth and the forest development path: A theoretical re-assessment of the environmental Kuznets curve for deforestation. *Forest Policy and Economics*, 118, 102259. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102259>
- Culas, R. J. (2012). REDD and forest transition: Tunneling through the environmental Kuznets curve. *Ecological Economics*, 79, 44-51. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.04.015>
- Edmonds, J. A., Link, R., Waldhoff, S. T. y Cui, R. (2017). A Global Food Demand Model for the Assessment of Complex Human-Earth Systems. *Climate Change Economics*, 8(4), 1-22.
- FAOSTAT. (2023). <https://www.fao.org/faostat/es/#data/RL>
- Fukase, E. y Martin, W. (2020). Economic growth, convergence, and world food demand and supply. *World Development*, 132, 104954. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.104954>
- Grossman, G. M. y Krueger, A. B. (1991). *Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement* (Working Paper 3914). National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w3914>
- Hill, E. (Ned). (2023). What Is Economic Development? And What Is the Job of an Economic Development Professional? *Economic Development Quarterly*, 37(1), 34-48. <https://doi.org/10.1177/08912424221147013>
- Hosonuma, N., Herold, M., Sy, V. D., Fries, R. S. D., Brockhaus, M., Verchot, L., Angelsen, A. y Romijn, E. (2012). An assessment of deforestation and forest degradation drivers in developing countries. *Environmental Research Letters*, 7(4), 044009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044009>
- Mather, A. S. (1992). The Forest Transition. *Area*, 24(4), 367-379.
- Pendrill, F., Persson, U. M., Godar, J. y Kastner, T. (2019). Deforestation displaced: Trade in forest-risk commodities and the prospects for a global forest transition. *Environmental Research Letters*, 14(5), 055003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab0d41>
- R Core Team. (2023). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K. y Vaughan, D. (s/f). *dplyr: A Grammar of Data Manipulation* (R package version 1.1.2) [R]. <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>
- World Bank. (2023). *World Bank Open Data*. World Bank Open Data. <https://data.worldbank.org>