



Escenarios para la transición energética a una economía carbono neutral en América Latina y el Caribe: algunos hechos estilizados[¥]

Scenarios for the energy transition to a carbon neutral economy in Latin America and the Caribbean: Some stylized facts

Luis Miguel Galindo*

Facultad de Economía, Universidad Nacional Autónoma de México

gpaliza@unam.mx

Paulina Reyes**

Facultad de Economía, Universidad Nacional Autónoma de México

pauli.rey05@gmail.com

Fernando González***

Facultad de Economía, Universidad Nacional Autónoma de México

luisfernandob182@gmail.com

*Profesor de la Facultad de Economía. **Alumna de la Facultad de Economía. ***Profesor adjunto de la Facultad de Economía.

[¥]Agradecemos los comentarios de Eduardo Vega. Los juicios y los errores son exclusivamente responsabilidad de los autores y no representan posiciones institucionales.

Resumen

El principal objetivo del artículo es analizar algunos hechos estilizados de la trayectoria de las emisiones de gases de efecto invernadero, provenientes del consumo de energía (CO₂ee), y construir escenarios prospectivos para América Latina y el Caribe que permitan ilustrar la urgencia, magnitud, posibilidades y limitaciones del esfuerzo de mitigación requerido para alcanzar la meta de una economía carbono neutral entre 2050-2070. La construcción de estos escenarios se basa en los modelos IPAT y STIRPAT, así como en las estimaciones de las hipótesis de la EKC y de la convergencia de emisiones entre países. Los principales resultados indican que las emisiones de CO₂ee están estrechamente asociadas a la evolución del PIB, PIB per cápita, población y consumo de energía, y que el actual proceso de desacoplamiento en la trayectoria de las emisiones de CO₂ee, provenientes de sus principales variables determinantes, es insuficiente para cumplir la meta de una economía carbono neutral a 2050.

Palabras clave: América Latina y Caribe, CO₂e, IPAT, STIRPAT, curva de Kuznets, convergencia.

Abstract

The main objective of the article is to analyze some stylized facts of the emissions trajectories from the energy consumption (CO₂ee) and to elaborate some prospective scenarios for Latin America and the Caribbean to illustrate the urgency, magnitude, possibilities, and limitations of the mitigation effort that is required to achieve a carbon neutral economy between 2050-2070. The construction of the scenarios is based on the IPAT and STIRPAT models and on the hypothesis of the environmental Kuznets curve and the convergence of emissions among countries. The main results indicate that CO₂ee emissions are correlated with the evolution of GDP, GDP *per capita*, population, and energy consumption, and that the actual decoupling process of the CO₂ee from the energy consumption from its main determinant variables is insufficient in order to accomplish the goal of a neutral carbon emissions economy in 2050.

Keywords: Latin America and the Caribbean, CO₂e, IPAT, STIRPAT, Kuznets curve, convergence.

JEL: C13, C51, Q40, 013

Fecha de recepción: 24 de marzo de 2022.

Fecha de aceptación: 25 de mayo de 2022.

1. Introducción

Estabilizar el aumento de temperatura global entre 1.5°C y 2°C requiere que la economía mundial sea carbono neutral entre 2050-2070 (IPCC, 2018). Esto implica instrumentar amplios e intensos procesos de mitigación de gases de efecto invernadero (GEI) en el conjunto de la economía global, durante las próximas tres a cinco décadas (IEA, 2021). De lo contrario, los costos económicos del cambio climático continuarán aumentando en forma creciente, afectando al conjunto de la economía, las condiciones sociales y el medio ambiente (IPCC, 2018). Además, estos efectos son más intensos en países de menor desarrollo y con temperaturas más altas, como es el caso de algunas de las naciones de América Latina y el Caribe (Burke et al., 2015; Dell et al., 2014).

La hipótesis central de este artículo es que la trayectoria actual y los escenarios proyectados de las emisiones de GEI, provenientes del consumo de energía en América Latina y el Caribe, es incompatible con la meta de construir una economía carbono neutral en 2050-2070 y que es, por tanto, indispensable y urgente instrumentar un intenso y generalizado proceso de descarbonización profunda.

El análisis de la trayectoria de emisiones y de la magnitud de este esfuerzo de mitigación en la región se lleva a cabo con la información de las emisiones de CO_{2e,t} proveniente de la base de datos del *Climate Analysis Indicators Tool* (CAIT) para el período disponible de 1990-2018, que se relaciona con el producto interno bruto (PIB_t), el producto interno bruto per cápita (PIBpc_t), la población (POB_t) y el consumo de energía (CE_t). Con base en ello se construyen diversos escenarios prospectivos a 2050.

Los principales resultados, derivados del análisis de la evolución histórica de las variables y de los escenarios prospectivos, muestran que la trayectoria de emisiones de América Latina y el Caribe es inconsistente con las metas de descarbonización profunda, y que son necesarias tasas de descarbonización muy superiores a las trayectorias históricas. Más aún, que seguir posponiendo este proceso de mitigación, por ejemplo, hasta 2030, implica tasas de mitigación para alcanzar la carbono neutralidad que no parecen factibles, atendiendo a las trayectorias históricas. De este modo, es indispensable instrumentar una estrategia de políticas públicas de largo plazo consistente con la descarbonización profunda.

Así, el objetivo de este artículo es analizar algunos hechos estilizados de la trayectoria de las emisiones de GEI provenientes del consumo de energía (CO_{2e,t}), y con base en ello construir algunos escenarios prospectivos para América Latina

y el Caribe, que permitan ilustrar la urgencia, la magnitud, las posibilidades y las limitaciones del esfuerzo de mitigación requerido para alcanzar la meta de una economía carbono neutral entre 2050-2070. Este análisis se realiza en el marco conceptual de los modelos IPAT, STIRPAT (*Stochastic Impacts by Regression Population Affluence and Technology*), curva de Kuznets ambiental (EKC) y de convergencia de las emisiones per cápita, con base en información de series de tiempo y datos de panel para los países de la región.

El artículo contiene cinco secciones. La primera es, obviamente, la introducción; la segunda es el marco conceptual donde se describen, brevemente, los modelos IPAT, STIRPAT, la EKC y la hipótesis de convergencia de las emisiones per cápita; la tercera es una revisión de la literatura empírica de los modelos aplicados, la EKC y la hipótesis de convergencia de las emisiones per cápita; la cuarta presenta la evidencia sobre las estimaciones de estos modelos y algunos escenarios prospectivos a 2050 y, finalmente, la quinta sección concluye.

2. Marco conceptual

El marco conceptual para analizar los principales hechos estilizados de la evolución de las emisiones de GEI, provenientes del consumo de energía, y la construcción de escenarios prospectivos se basa en los modelos IPAT, STIRPAT y las estimaciones econométricas de las hipótesis de EKC y de convergencia de emisiones de CO_2ee_t con datos de series de tiempo y de datos de panel para los países de América Latina y el Caribe:

1. La identidad del IPAT ha sido ampliamente utilizada para analizar las relaciones entre la trayectoria de CO_2ee_t , el producto y el consumo de energía (Labandeira et al., 2007; Ekins, 2000). El modelo IPAT especifica las emisiones de GEI provenientes de la energía como función de la población, del producto interno bruto per cápita ($PIBpc_t$), de la razón del consumo de energía a PIB y de la razón de CO_2ee_t con respecto al consumo de energía (ecuación 1) o como función del producto interno bruto (PIB), de la razón del consumo de energía a PIB y de la razón de emisiones de CO_2e con respecto al consumo de energía (ecuación 2) (Nakicenovic et al., 2000):

$$(1) \quad \Delta CO_2ee_t = \Delta POB_t + \Delta \left(\frac{PIB_t}{POB_t} \right) + \Delta \left(\frac{CE_t}{PIB_t} \right) + \Delta \left(\frac{CO_t}{CE_t} \right)$$

$$(2) \quad \Delta CO2e_t = \Delta PIB_t + \Delta \left(\frac{CE_t}{PIB_t} \right) + \Delta \left(\frac{CO_t}{CE_t} \right)$$

Donde $CO2e_t$ representa las emisiones de CO_2 , equivalentes, que provienen del consumo de energía, POB_t es la población, PIB_t es el producto interno bruto y CE es el consumo de energía. La razón de PIB_t sobre POB_t representa el PIB per cápita. El subíndice t indica el año. Las ecuaciones (1) y (2) tienen también su representación en niveles.

2. El modelo STIRPAT (*Stochastic Impacts by Regression Population Affluence and Technology*) representa una versión estocástica de la identidad del IPAT, donde se relaciona las emisiones de $CO2e_t$ con la evolución de la población, del producto, de alguna variable de tecnología o de control (Lin et al., 2009; Dietz y Rosa, 1994):

$$(3) \quad coe_{2t} = \alpha + \beta pob_t + \gamma pibpc_t + \delta tec_t + \varphi otros_t + \mu_t$$

Donde coe_{2t} representa a las emisiones de GEI provenientes del consumo de energía, pob_t es la población, $pibpc_t$ es el PIB per cápita, tec_t es la tecnología, $otros_t$ representa a otras variables de control, como el nivel de urbanización o la intensidad energética y μ_t es el término aleatorio (Fan et al., 2006). Las variables en minúsculas corresponden al logaritmo de las series.

La elasticidad ecológica, capacidad de respuesta o sensibilidad de los impactos ambientales a sus determinantes, se identifica a través de los coeficientes: α , β , γ , δ , μ . Así, el IPAT representa el caso específico donde: $\alpha=\beta=\gamma=\delta=\mu=1$. Además, es común excluir al término de la tecnología, ya que no existe una variable apropiada de medición (Dietz y Rosa, 1994) y donde es factible incorporar términos cuadráticos u otras variables que se consideren relevantes (York et al., 2003).

De este modo, una especificación del modelo STIRPAT ampliamente utilizada corresponde a (Bargaoui et al., 2014; Hassan, 2016; Salim et al., 2017; Liddle, 2011):

$$(4) \quad coe_{2it} = \beta_0 + \beta_1 pob_{it} + \beta_2 ypc_{it} + \beta_{3t} \left(\frac{CE}{Y} \right)_{it} + u_{it}$$

3. La hipótesis de la EKC de emisiones argumenta la presencia de una relación cóncava entre las emisiones de $CO2e_t$, per cápita y el aumento del ingreso per cápita (Labandeira et al., 2007; Ekins, 2000; World Bank, 1992). En este sentido,

el proceso de desacoplamiento entre las emisiones per cápita y el producto per cápita se asocia al cumplimiento de la EKC (Cohen et al., 2018). La hipótesis de la EKC puede representarse de acuerdo con la ecuación (5) (Pao y Tsai, 2011; Dijkstra y Vollerbergh, 2005):

$$(5) \quad co2eepc_{it} = \beta_0 + \beta_1 ypc_{it} + \beta_2 ypc_{it}^2 + \gamma_t + \theta_i + \beta_3 co2e_{it} + u_{it}$$

Donde $co2eepc_{it}$ representa las emisiones de GEI per cápita provenientes del consumo de energía, ypc_{it} es el ingreso per cápita, γ_t son los efectos fijos por año, θ_i son los efectos fijos por países y u_{it} representa el término de error. El subíndice i corresponde al país y el subíndice t al año. Las letras en minúsculas representan el logaritmo de las variables.

El punto de inflexión en logaritmos se define como (Pao y Tsai, 2011):

$$(6) \quad \frac{\beta_1}{2\beta_2}$$

La hipótesis de la EKC implica que: $\beta_1 \geq 0$ y $\beta_2 \leq 0$. En el caso de que β_2 no es estadísticamente significativa, entonces se rechaza la hipótesis de la EKC, y si el punto de inflexión corresponde a un PIB per cápita muy alto y fuera de la muestra puede argumentarse que la relación entre las emisiones y el PIB per cápita es monótona positiva en los períodos relevantes (Heil y Selden, 2001; Pao y Tsai, 2011). La ecuación (6) puede modificarse para incluir el consumo de energía, en particular si la relación entre las emisiones y el ingreso es lineal $\beta_2 = 0$ (Pao y Tsai, 2011). Es posible, además, incluir un término de las emisiones rezagado en un período para atender los posibles problemas de sesgo de Nickel (1981) (Deryugina y Hsiang, 2014; Dell et al., 2014).

$$(7) \quad co2eepc_{it} = \beta_0 + \beta_1 ypc_{it} + \beta_2 ypc_{it}^2 + \gamma_t + \theta_i + \beta_3 co2cepc_{it} + \beta_4 ce_{it} + u_{it}$$

Donde ce_{it} corresponde al consumo de energía y pc al término per cápita.

4. La hipótesis de convergencia de las emisiones per cápita argumenta, en forma similar a la literatura aplicada de crecimiento económico, que los países con emisiones per cápita más bajas tienen tasas de crecimiento de las emisiones per cápita más altas, y aquellos con emisiones per cápita más elevadas tienen tasas de crecimiento de las emisiones per cápita más bajas (Nguyen, 2005). Estas diferencias

en las tasas de crecimiento de las emisiones entre países, en el futuro, conducen a su proceso de convergencia.

El análisis de la presencia de convergencia en las emisiones de efecto invernadero puede realizarse con base en la ecuación (8), donde las tasas de crecimiento promedio de las emisiones de CO_2e_t per cápita dependen del nivel de emisiones per cápita inicial (Barro y Sala i Martin, 2009):

$$(8) \quad \Delta CO_2pc_i = \alpha + \beta CO_2pc_{0i} + \varepsilon_i$$

Donde ΔCO_2pc_i es la tasa de crecimiento promedio anual de las emisiones de CO_2e per cápita para el período considerado por país i y $CO_2e_{pc_{0i}}$ corresponde a las emisiones per cápita iniciales de cada uno de los países (es decir, 1980). Así, un valor del coeficiente $\beta \leq 0$ implica una convergencia no condicional en emisiones (Nguyen, 2005).

3. Revisión de la literatura

El modelo IPAT corresponde a una identidad donde se considera que las emisiones de CO_2e_t son determinadas por la evolución de la población, la riqueza aproximada por el PIB o PIB per cápita y la evolución tecnológica aproximada por las intensidades de emisiones a energía o a PIB (Ekins, 2000). Este modelo ha sido ampliamente utilizado para construir escenarios y analizar los determinantes de las emisiones de CO_2e_t al nivel internacional, para regiones, países y al nivel agregado, o por sectores como electricidad o algunas industrias como el cemento (Gutman y Gutman, 2017; Nakicenovic et al., 2000; Duro y Padilla, 2011; Vide, 2007; Alcántara 2009; Tursun et al., 2014; Samaniego y Galindo 2009; Sandoval, 2013).

La evidencia presentada en estos estudios indica que, en efecto, los principales determinantes de la evolución de las emisiones de CO_2e_t corresponden a la evolución del PIB_t, del PIB_t per cápita y de la población, y que, en general, la evolución histórica de las razones de consumo de energía a PIB_t y de emisiones de CO_2e_t a consumo de energía son insuficientes para contener el aumento de las emisiones o desacoplar su trayectoria con respecto al producto, al producto per cápita y a la población (Akimoto et al., 2014; Nakicenovic et al., 2000). Asimismo, es común que los países con menor desarrollo tengan menos razones de consumo

de energía a PIB y de emisiones de CO_2ee_t a consumo de energía (Ritchie y Roser, 2018). En este sentido, las emisiones de CO_2ee_t continuarán aumentando, en las próximas décadas, en un escenario inercial (*Business As Usual*) de no instrumentarse intensos procesos de descarbonización de la economía.

El modelo STIRPAT, desarrollado por Dietz y Rosa (1997), ha sido también muy utilizado para analizar las emisiones de CO_2ee_t . Este tiene una especificación derivada, en el inicio, de la ecuación del IPAT, y que se transforma para poder estimar, econométricamente, la ecuación del STIRPAT, donde las emisiones son función de la población y del PIB per cápita, así como, potencialmente, de alguna variable que permita aproximar la tecnología. Los principales resultados de estos modelos STIRPAT confirman la estrecha asociación entre la evolución de las emisiones de CO_2ee_t y la evolución de la población, el PIB, y el PIB per cápita (Bargaoui et al., 2014; Lohwasser et al., 2020). Además, se observa que la intensidad energética y el proceso de urbanización son variables relevantes en los modelos STIRPAT (Hassan, 2016; Salim et al. 2017; Fan et al., 2006).

Las estimaciones de las elasticidades ecológicas de las emisiones de CO_2ee con respecto a la población y el PIB o PIB per cápita son estadísticamente significativas con coeficientes alrededor de la unidad, menores a 1 o mayores a 1, o incluso, en algunos casos, con coeficientes para la población con un valor superior a 2 (Lohwasser et al.; 2020, Dietz y Rosa, 1997; Shi, 2003; York et al., 2003; Cole y Neumayer, 2004; Martínez-Zarzoso et al., 2007; Liddle y Lung, 2010; Singh y Mukherjee, 2018; Narayan y Narayan, 2010; Ajmi et al., 2015). Estas estimaciones muestran que las elasticidades ecológicas con respecto al PIB o al PIB per cápita son más elevadas en países con un ingreso per cápita bajo y, por el contrario, más bajas en países con un PIB per cápita más alto (entre 0.8 y 1.2). (Dietz y Rosa, 1997; York et al., 2003; Yan et al., 2016; Kristrom y Lundgren, 2005). Además, se estima, con modelos STIRPAT, que la evolución de la estructura demográfica incide en la evolución de consumo de electricidad residencial y de energía para transporte en los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) (Liddle, 2011), y que el consumo de cemento y metales en América Latina seguirá aumentando hasta 2050 (Van Ruijven et al., 2016).

La evidencia sobre la hipótesis de la EKC de emisiones de CO_2ee_t sugiere que es válida, pero que los puntos inflexión es aún tema de debate y tiene comportamientos muy heterogéneos dependiendo del contaminante (Gómez y Rodríguez, 2020; Heil y Selden, 2001; Wold Bank, 1992). Por ejemplo, se estiman puntos de inflexión de las emisiones de CO_2ee_t en alrededor de 10 mil dólares o incluso

en puntos más elevados (Heil y Selden, 2001). La EKC para emisiones de CO₂e se relaciona con economías con un PIB per cápita más alto que tienen una estructura con mayor participación de los servicios y la imposición de diversas regulaciones y políticas públicas (York et al., 2003; Shi, 2003).

La evidencia sobre la hipótesis de convergencia de las emisiones de CO₂e, es heterogénea. Así, se observa que existe una convergencia de emisiones de CO₂ por clubes de país; esto es, con características económicas, sociales e institucionales similares que muestran trayectorias de convergencia de emisiones per cápita: en particular, en el caso de los países desarrollados, pero que no existe una convergencia global de las emisiones. Por ejemplo, Nguyen (2005) y Strazicich, y List (2003), argumentan que existe convergencia en emisiones de CO₂ en países desarrollados. Ello es consistente con la literatura de crecimiento económico y la formación de clubes de países para los procesos de convergencia (Quah, 1997).

4. La evidencia

4.1. Descripción de las variables y base de datos

La base de datos corresponde a información anual agregada y por países para América Latina y el Caribe,¹ para el período 1990-2018 de las emisiones de GEI totales y aquellas provenientes del consumo de energía del CAIT-World Resources Institute (WRI); el PIB en términos reales (dólares a precios constantes de 2010), el PIB per cápita de la base de datos del Banco Mundial (dólares a precios constantes de 2010), el consumo de energía de la base de CepalStats y la población proveniente del Department of Economic and Social Affairs (ONU, 2019) (Tabla de base de datos en Apéndice). Los principales estadísticos de las variables utilizadas se sintetizan en la Tabla 1.

¹ Los países incluidos en el análisis están definidos en el Apéndice.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos básicos de emisiones totales y emisiones provenientes de la energía, PIB, PIB per cápita, consumo de energía y población, 1990-2018

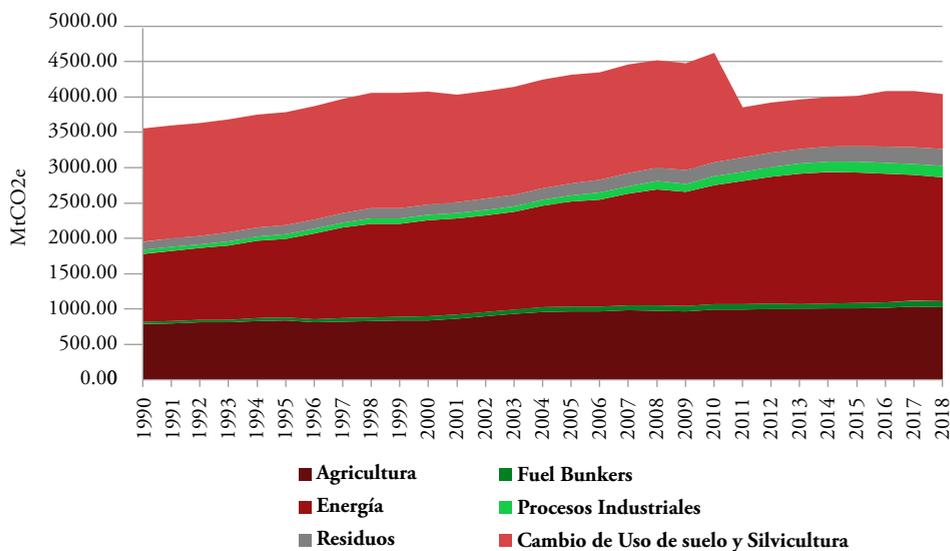
	Media	Mediana	Máximo	Mínimo	Std. Dev.	Observaciones
			Niveles			
CO ₂ et _t	3983.16	3970.97	4551.14	3520.64	265.44	29
CO ₂ ee _t	1455.74	1436.94	1855.70	960.58	289.74	29
CO ₂ ee _t per cápita	2.66	2.64	3.05	2.19	0.26	29
PIB _t	4.03239E+12	3.84495E+12	5.55219E+12	2.56445E+12	9.8609E+11	29
PIBpc _t	7274.44	6996.02	8671.93	5803.82	1007.46	29
POB _t	547 626.10	550 555.20	642 216.70	442 840.10	60 632.19	29
CE _t	3 576 684.00	3 475 111.00	4 556 609.00	2 472 091.00	719 530.30	29
			Primeras diferencias			
ΔCO ₂ et	0.493	1.273	3.258	-17.067	3.610	28
ΔCO ₂ ee	2.213	2.854	8.101	-1.868	2.473	28
ΔCO ₂ ee _t per cápita	0.86	1.44	6.41	-2.79	2.31	28
ΔPIB _t	2.82	2.76	6.43	-2.01	2.06	28
ΔPIBpc _t	1.46	1.29	5.25	-3.13	2.00	28
ΔPOB _t	1.34	1.28	1.83	0.94	0.27	28
ΔCE _t	2.20	2.23	6.88	-2.64	2.15	28

Fuente: Elaboración propia con base en información de CAIT-WRI, Banco Mundial, Celade y CepalStat.

CO₂et_t = emisiones de CO₂ equivalentes totales, CO₂ee_t = emisiones de CO₂ equivalentes provenientes de la energía, CO₂ee_t per cápita = CO₂ equivalente provenientes de la energía por habitante, PIB_t = producto interno bruto, PIBpc_t = producto interno bruto per cápita, POB_t = población, CE_t = consumo de energía.

América Latina y el Caribe emitía alrededor de 3.9 mil millones de tCO_2e_t en 2018, con una tasa de crecimiento promedio anual de 0.40% entre 1990-2018 que, sin embargo, es menor, e incluso negativa (-0.07%), entre 2000-2018 (WRI, 2021). Ello se traducía en una media de 6.22 tCO_2e_t per cápita en 2018, similar a la media global de 6.45 en 2018, y con una tasa de crecimiento promedio anual en la región de -0.91% para el período 1990-2018. La estructura de las emisiones de CO_2e_t en América Latina y el Caribe muestran la relevancia de las fuentes de energía, del cambio de uso de suelo y silvicultura, así como de la agricultura, el elevado dinamismo de las emisiones provenientes de residuos y el continuo crecimiento de aquellas emisiones provenientes de procesos industriales (Gráfica 1).

Gráfica 1. Estructura y evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en América Latina y el Caribe, 1990-2028



Fuente: Elaboración propia con datos del CAIT-WRI.

En este contexto, se observa que las emisiones provenientes de la energía eran de 1.7 mil millones de tCO_2e_t en 2018, con una tasa de crecimiento promedio anual de 2.18% entre 1990-2018. Ello corresponde a una media per cápita de 2.73 tCO_2e_t , que es similar a la media global y donde la tasa de crecimiento promedio anual, entre 1990-2018, fue de 0.84%.

La evolución de estas emisiones de CO_2e_t son muy heterogéneas por países y reflejan, además de la asociación, general, entre las emisiones per cápita y el PIB per cápita por país, la presencia de condiciones específicas nacionales asociadas, por ejemplo, a la producción de petróleo y gas o minerales. Estas diferencias en las emisiones per cápita resultan relevantes en el contexto de las estrategias de mitigación, ya que los países con menores emisiones deben concentrarse en que estas no aumenten, mientras que los países con emisiones más altas deben instrumentar intensos procesos de mitigación.

Tabla 2. Emisiones de GEI por países en América Latina y el Caribe

		PROMEDIO DE 1990-2018		
10 más altos	País	CO_2eT (MtCO_2e)	CO_2eT per cápita (tCO_2e per cápita)	PIB per cápita (dólares a precios constantes de 2010)
1	Brasil	1722.68	9.60	7497.74
2	México	555.98	5.28	8711.03
3	Argentina	373.23	9.80	11564.94
4	Venezuela	343.52	17.48	
5	Colombia	233.05	5.62	4710.61
6	Perú	139.22	5.08	4255.35
7	Bolivia	109.57	12.63	2320.93
8	Paraguay	89.19	15.69	4430.42
9	Ecuador	80.96	6.52	4982.94
10	Chile	40.32	2.43	10040.21

Fuente: Elaboración propia con base en CAIT-WRI y Banco Mundial.

Los estadísticos de las pruebas de raíces unitarias para series de tiempo de Dickey Fuller Aumentada (ADF) (Dickey y Fuller, 1981), de Phillips-Perron (PP) (Phillips y Perron, 1988) y Kwiatkowsky (KPSS) (Kwiatkowsky et al., 1992) indican que las emisiones provenientes del consumo de energía, el PIB_t, el PIB_{pc,t}, el consumo de energía para América Latina y el Caribe son series no estacionarias (I(1)) (Tabla 3). La evidencia para las razones de consumo de energía a PIB_t y de CO_2e_t a consumo de energía es mixta, se encontraron tanto series estacionarias como no estacionarias.

Las pruebas de raíces unitarias para datos de panel de Levin y Lin (1992), Im et al. (1995), ADF-Fisher, PP-Fisher (Maddala y Wu, 1999) sintetizadas en la Tabla 4, con información por país de América Latina y el Caribe, indican que las series de emisiones provenientes de la energía, el PIB_t, el PIB_{pc,t}, son no estacionarias, y sugieren evidencia mixta sobre las razones de consumo de energía a PIB_t y de CO_2e_t a consumo de energía.

Tabla 3. Pruebas de raíces unitarias de emisiones provenientes de la energía, PIB, PIBpc_t, consumo de energía, razón de consumo de energía a PIB y razón de emisiones provenientes del consumo de energía a consumo de energía, 1990-2018

Variable	ADF			PP			KPSS		Orden de integración
	A	B	C	A	B	C	n u	n t	
Niveles									
CO ₂ ee _{it}	0.17(2)	-2.85(2)	1.88(2)	-0.06	-2.52	3.37	0.15*	0.67*	I(1)
PIB _{it}	-1.28(2)	-1.39(2)	7.22(2)	-1.47	-1.36	6.93	0.09	0.69*	I(1)
PIBpc _t	-1.69(2)	-0.85(2)	3.82(2)	-1.88	-0.84	3.70	0.08	0.67*	I(1)
Ce _t /PIB _t	-2.30(2)	-1.72(2)	1.43(2)	-2.40	-1.75	1.59	0.11	0.55*	I(1)
CO ₂ ee _{it} /Ce _t	-1.76(2)	-1.88(2)	-0.04(2)	-1.17	-1.91	-0.04	0.16*	0.16	I(1)
Primeras diferencias									
ΔCO ₂ ee _{it}	-4.02(2)*	-3.20(2)*	-1.52(2)	-4.02*	-3.14*	-2.42*	0.09	0.40	I(0)
ΔPIB _t	-4.67(2)**	-4.50(2)**	-1.13(2)	-4.66**	-4.48**	-2.14*	0.08	0.20	I(0)
ΔPIBpc _t	-4.64(2)**	-4.67(2)**	-3.37(2)**	-4.62**	-4.65**	-3.33**	0.09	0.10	I(0)
ΔCe _t /ΔPIB _t	-5.31(2)**	-5.42(2)**	-5.10(2)**	-5.31**	-5.41**	-5.10**	0.12	0.12	I(0)
ΔCO ₂ ee _{it} /ΔCe _t	-6.52(2)**	-5.72(2)**	-5.83(2)**	-6.51**	-5.72**	-5.83**	0.48**	0.40	I(0)

Fuente: Elaboración propia con datos del CAIT-WRI.

El modelo A es con constante y tendencia, el modelo B con constante y el modelo C sin constante y sin tendencia. Para las pruebas ADF y PP la hipótesis nula considera que la serie es no estacionaria y la hipótesis alternativa consta de una serie estacionaria; por su parte, para la prueba KPSS la hipótesis nula considera que la serie es estacionaria y en la hipótesis alternativa la serie es no estacionaria.

* Indica los valores que rechazan la hipótesis nula al 5%. **Indica los valores que rechazan la hipótesis nula al 1% de significación, mientras que los valores entre paréntesis representan el número de rezagos utilizados en la prueba. Las letras minúsculas significan el logaritmo de las series.

Tabla 4. Pruebas de raíces unitarias de panel, 1990-2018

Variable	LLC			IPS		ADF-FISHER			PP - Fisher		
	A	B	C	A	B	A	B	C	A	B	C
CO2 _e eit	-5.92	-3.39	8.28	-2.05	-3.29	81.54	110.27	20.09	113.99	79.68	19.93
ΔCO2 _e eit	-1162.63	-1074.06	-865.74	-455.46	-451.38	660.63	2775.82	3092.60	714.82	3913.92	2922.89
CO2 _e epcit	-5.04	-3.75	-6.17	-3.48	-4.18	103.29	117.94	97.60	116.83	80.13	110.79
ΔCO2 _e epcit	-117.4950	-94.9414	-202.3500	-74.0027	-61.7784	703.604	1882.82	2882.13	721.42	3373.15	2631.52
PIB _i t	-0.4752	1.7291	20.5733	4.85141	0.57408	28.7327	54.2912	0.55947	49.6647	57.2392	0.42429
ΔPIB _t	-1842.3000	-1681.4900	-985.4990	-748.909	-783.386	439.711	5056.21	3267.48	466.232	5540.76	3155.84
PIB _p ct	0.4820	0.7867	12.7565	4.14902	-0.56055	41.255	70.9222	2.92737	38.273	67.2066	2.64469
ΔPIB _p ct	-128.8740	-107.3670	-108.0980	-104.356	-97.2216	539.118	4387.42	4168.52	596.297	5318.9	4089.5
CE _t	-3.4939	1.4182	14.3906	-1.75172	-0.75346	240.909	60.4926	5.71754	145.641	80.4071	5.96735
ΔCE _t	-1366.0800	-1271.2400	-969.3840	-561.974	-570.855	782.758	3927.95	3112.82	827.631	5073.75	3862.98
CE/PIB	0.45439	0.93715	4.13359	0.59837	-1.95895	59.3863	73.2996	16.9356	98.2627	144.085	25.2062
CO2 _e t/CE	-4.1979	-1.786	-1.7514	-4.56741	-1.97744	114.66	82.4298	49.5344	151.917	118.277	55.5215

Fuente: Elaboración propia con datos del CAIT-WRI.

El subíndice *i* corresponde al país y el subíndice *t* al año. Los valores de la tabla corresponden al estadístico de la prueba de raíces unitarias de panel de la serie en logaritmos. Los valores entre paréntesis representan el número óptimo de rezagos basado en el criterio de información de Schwartz. Todas las pruebas tienen el supuesto de la presencia de raíces unitarias bajo la hipótesis nula. *, ** y *** indican rechazo de la hipótesis nula al 1%, 5% y 10% de significancia estadística respectivamente. Modelo A incluye intercepto y tendencia. Modelo B incluye intercepto y Modelo C no incorpora intercepto o tendencia. El estadístico de la prueba de ADF-Fisher corresponde a una distribución chi-cuadrada.

4.2. Estimaciones económicas y econométricas

Las estimaciones realizadas indican que:

1. La evolución histórica del conjunto de las variables de CO_2ee_t , PIB_t , $PIBpct_t$, CE_t , $(CE/PIB)_t$, $(CO_2ee/CE)_t$ incluidas en los modelos IPAT de las ecuaciones (1) y (2) se sintetizan en la Tabla 5.

De este modo, un escenario inercial incluye una tasa de crecimiento promedio anual de las emisiones provenientes de la energía de 2.1% entre 1990-2018. Ello está acompañado, en la ecuación (2), de una tasa crecimiento promedio anual del PIB de 2.7%, de una tasa de crecimiento promedio anual de la razón de consumo de energía a PIB de -0.6% y de una tasa de crecimiento promedio anual de la razón de CO_2ee a consumo de energía de 0.01%. De este modo, la mitigación en América Latina y el Caribe está asociada, en todo caso, al aumento de la eficiencia energética.

La ecuación (2) muestra que la tasa de crecimiento promedio de las emisiones provenientes del consumo de energía está acompañada de tasas de crecimiento promedio anual aproximadas de la población de 1.3%, del PIB per cápita de 1.4%, de la razón de consumo de energía a PIB de -0.6% y de la razón de emisiones provenientes de la energía a consumo de energía a PIB de 0.01%. En este caso, se observa la importancia que adquiere la tasa de crecimiento de la población que explica alrededor de la mitad del total de la tasa de crecimiento de las emisiones.

2. La estimación econométrica del modelo STIRPAT, ecuación (4), con base en los procedimientos de Fully Modified OLS (FMOLS) y Dynamics OLS (DOLS) (McCoskey y Kao, 1999; Phillips y Moon, 1999; Phillips y Hansen, 1990) para cointegración, para el conjunto de América Latina y el Caribe no rechazan la hipótesis de cointegración (Tabla 6). Esto es, los residuales de las regresiones estimadas son series estacionarias (I(0)).

Tabla 5. Tasas de crecimiento promedio anual de las emisiones provenientes del modelo IPAT, 1990-2018

	1990-2000	2000-2010	2010-2018	1990-2018
CO_2ee_t	3.15	2.03	0.47	2.11
CO_2eePC	1.67	0.91	-0.47	0.83
PIB_t	2.87	2.91	1.41	2.73
$PIBpct$	1.40	2.10	0.63	1.45
CE_t	2.19	2.34	1.02	2.10
$(CE/PIB)_t$	-0.67	-0.56	-0.38	-0.61
CO_2ee/CE	0.94	-0.30	-0.62	0.01
POB	1.46	1.11	0.77	1.27

Fuente: elaboración propia con con datos del CAIT-WRI.

Las estimaciones econométricas indican, además, que las elasticidades ecológicas de las emisiones con respecto a la población son entre 1.6 y 1.8 y la elasticidad de las emisiones con respecto al PIB per cápita es entre 0.4 y 0.6 (Tabla 7). Por su parte, la elasticidad de las emisiones del consumo de energía a PIB es entre 0.44 y 0.53. Ello indica la importancia de la población para determinar la evolución de las emisiones de energía.

Tabla 6. Pruebas de cointegración basados en el procedimiento de FMOLS y DOLS para el modelo STIRPAT (ecuación (4)), 1990-2018

Método	ADF	PP
FMOLS	-1.19385 (5)	-8.45354(1)
DOLS	-6.308376 (1)	-1.43742 (1)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Estimaciones econométricas del modelo STIRPAT para América Latina y el Caribe (ecuación (4)) con datos de series de tiempo, 1990-2018

	pob_t	$pibpc_t$	$(ce/pib)_t$
FMOLS: co_2eepc_t	1.5950	0.5930	0.4410
DOLS: co_2eepc_t	1.8557	0.4587	0.5339

Fuente: Elaboración propia.

Las estimaciones por países de América Latina y el Caribe del modelo STIRPAT (ecuación (4)), con base en el procedimiento de cointegración de Kao (1999), Kao y Chiang, (2000) y Pedroni (1999, 2004), del tipo de Engle y Granger (1987) basada en el análisis de los residuales y la prueba de Maddala y Wu (1999), del tipo de Johansen (1988, 1995) para datos de panel indican la presencia de cointegración entre las variables consideradas (Tabla 8). Esto es, los residuales son estacionarios.

Tabla 8. Estadísticos de las pruebas de cointegración para datos de panel (ecuación (4)), 1990-2018

Test de panel para cointegración	variable dependiente CO2eet			
Pedroni (1999, 2004)				
	Estadístico	Prob		
Dentro (Within)				
Panel v	-0.097868	0.5390		
Panel rho	-4.410686	0.0000		
Panel PP	-7.583623	0.0000		
Panel ADF	-2.463945	0.0069		
Entre (Between)				
Group rho	0.523572	0.6997		
Group PP	-4.055878	0.0000		
Group ADF	-2.742566	0.0030		
Kao (1999)				
	Estadístico	Prob		
ADF	-4.373209	0.0000		
Maddala y Wu (1999)				
	λ-Traza Prueba rango	Prob	λ-Max Prueba rango	Prob
Ninguno	720.10	0.0000	543.1	0
Al menos 1	282.40	0.0000	203.7	0
Al menos 2	137.70	0.0000	110.6	0
Al menos 3	114.10	0.0000	114.1	0

Los valores corresponden a los estadísticos de las pruebas de cointegración de panel.

*, ** y *** indican rechazo de la hipótesis nula al 1%, 5% y 10% de significancia estadística, respectivamente. Pedroni (1999, 2004) y Kao (1999) tienen como la hipótesis nula de no cointegración. Las variables están representadas en logaritmos. Todas las pruebas fueron estimadas con intercepto, pero sin tendencia.

Los coeficientes estimados con datos de panel muestran rangos entre 0.9-1.6 para la población, entre 0.6-1.23 para el PIB y entre 0.3-0.4 para la razón de consumo de energía a PIB (Tabla 9). Estas estimaciones sugieren la importancia de la población y del PIB para determinar la evolución de las emisiones y donde la razón de consumo de energía a PIB tiene también un efecto positivo en las emisiones. Los valores de estos coeficientes son consistentes con las estimaciones con series de tiempo (Tabla 7). De este modo, solo se presentan los escenarios exclusivamente con series de tiempo, reconociendo que los escenarios con datos de panel son relativamente similares.

Tabla 9. Coeficientes del modelo STIRPAT (ecuación (4)) con datos panel, 1990-2018

	pob_t	pibpc_t	(ce/pib)_t
CO ₂ ee _t	0.920903 (0.0000)	1.230083 (0.0000)	0.318636 (0.0000)
CO ₂ ee _t .E.F	1.591696 (0.0000)	0.593765 (0.0000)	0.403591 (0.0000)

Fuente: Elaboración propia.
EF=Efectos fijos.

3. La estimación de la hipótesis de la EKC para el conjunto de América Latina y el Caribe no se rechaza. En efecto, la evidencia sugiere la presencia de una relación cóncava entre las emisiones de CO₂ee_t per cápita y el aumento del ingreso per cápita (Tabla 10). Este efecto es más evidente en la estimación con efectos fijos. En este contexto, se observa que el punto de inflexión, estimado con base en la ecuación (6), se ubica entre 11 mil y 12 mil dólares per cápita, lo que es relativamente consistente con estudios previos sobre un punto de inflexión en alrededor de 10 mil dólares. De este modo, es posible considerar que la región tendrá, en las próximas décadas, un proceso de caída de las emisiones provenientes del consumo de energía, aunque este proceso de mitigación requiere un tiempo de maduración.

Tabla 10. Estimaciones de la relación entre co_2e_t per cápita y PIBpc, 1980-2018

	Sin efectos fijos	Con efectos fijos
Intercepto	-34.2722 (7.742061) (0.0000)	-20.69377 (2.286749) (0.0000)
PIBpc _t	8.0381 (1.845194) (0.0000)	4.314286 (0.526295) (0.0000)
PIBpc _t ²	-0.436891 (0.109437) (0.0000)	-0.188507 (0.030193) (0.0000)
R ²	0.089973	0.9880
Observaciones	783	783
Punto de inflexión	-9.1992	-11.4433

Fuente: Elaboración propia.
Errores estándar y valores P entre paréntesis.

4. La estimación de la hipótesis de convergencia de las emisiones per cápita, basada en la ecuación (8), muestra un coeficiente negativo. Ello indica que existe un proceso de convergencia no condicional en las emisiones per cápita provenientes del consumo de energía, lo que representa un argumento a favor de la EKC para grupos de países o regiones (Tabla 10). Esto es, no existe una convergencia global incondicional, pero sí un proceso de convergencia por grupos de países con condiciones económicas, sociales o institucionales similares, posiblemente por regiones geográficas.

Tabla 11. Estimaciones de convergencia

Coefficiente	Estimaciones
α	-1.812806 Prueba t: -9.34653 Valor P: 0.0000
β	-0.289528 Prueba t: -10.29455 Valor P: 0.0000
Numero de observaciones	695
R ² =	0.132642

Las estimaciones son realizadas con MCO.

4.3. Escenarios prospectivos a 2050

El Acuerdo de París de cambio climático tiene como objetivo estabilizar el aumento de temperatura entre 1.5°C o 2°C. Para ello es necesario instrumentar grandes reducciones de las emisiones de CO₂ que solo son posibles con transformaciones profundas al actual estilo de crecimiento económico. Por ejemplo, las trayectorias de emisiones para limitar el aumento de temperatura en 1.5°C o 2°C deben:

- Limitar el aumento de temperatura en 1.5°C, que implica que las emisiones de CO₂ deben ser entre 25% y 45% menores al nivel de las emisiones de CO₂, de 2010, en 2030 y deberán llegar a cero emisiones netas alrededor de 2050 (2045-2055). Asimismo, las simulaciones realizadas muestran que cuanto más se tarde en instrumentar la reducción de emisiones menos probable es este escenario (IPCC, 2018). Por ejemplo, en caso de que las emisiones no lleguen a su máximo antes de 2030 resulta poco probable el escenario de 1.5°C.
- Limitar el aumento de la temperatura en 2°C (en un escenario con 66% de probabilidad), que implica reducir las emisiones de CO₂ en 25% a 2030 y alcanzar cero emisiones netas en 2070 (2065-2080) (IPCC, 2018).

Los escenarios prospectivos² de emisiones de GEI elaborados con los modelos estimados, que dependen de la evolución del PIB, del PIB per cápita y de la población (Apéndice), y que son consistentes con los escenarios planteados por la NGFS (2021) indican que:

1. Los escenarios contruidos con el IPAT (ecuación 2), sintetizados en las Tablas 12 y 13 y en las Gráficas 2 y 3 a 2050 muestran que³:
 - 1.1 En el escenario inercial⁴ (BAU) las emisiones provenientes del consumo de energía continuarán aumentando, con una tasa de crecimiento promedio anual de 2.1%, llegando a 3.511 Mtco₂ee en 2050, lo que representa 4.61 t co₂ee, per cápita.

² Estos escenarios son solo ilustrativos y no representan un pronóstico.

³ Los escenarios con base en el PIB per cápita y la población presentan resultados similares.

⁴ IEA (2017) supone una tasa de crecimiento del PIB de 2.8% promedio anual entre 2016-2040 y que la población pase de 501 a 599 millones en América Latina y el Caribe entre 2016-2040.

- 1.2. Un escenario ordenado donde la mitigación empieza desde 2020 para alcanzar una economía carbono neutral⁵ en América Latina y el Caribe a 2050 requiere, en un escenario de tasa de crecimiento promedio anual del PIB de 2%, que, por ejemplo, la tasa de crecimiento promedio anual de la intensidad energética sea de -3.5% y que la tasa de crecimiento promedio anual de la razón de CO₂ee_t a consumo de energía sea -4%. Estos ritmos de reducción de la intensidad energética y carbónica son, sin duda, sustanciales, y muestran la magnitud de las transformaciones estructurales requeridas para alcanzar una economía baja en carbono en 2030-2050.
- 1.3. Un escenario desordenado, con una tasa de crecimiento promedio anual del PIB de 2% y donde se pospone el comienzo de los procesos de mitigación a 2030 implica instrumentar tasas de crecimiento promedio anual de la intensidad energética de -5% y que la tasa de crecimiento promedio anual de la razón de CO₂ee_t a consumo de energía sea de -5.3%. Estos procesos de desacoplamiento son particularmente intensos y difíciles de alcanzar. Ello sugiere que el escenario desordenado en América Latina y el Caribe implica instrumentar ajustes que pueden tener un alto costo económico.
- 1.4. El escenario de rápido crecimiento, representado por una tasa de crecimiento promedio anual del PIB de 4% hasta 2050, con tasas de crecimiento promedio anual de las razones de consumo de energía a PIB y de emisiones provenientes del consumo de energía a consumo de energía de -2% y -2.5%, respectivamente, es insuficiente para llegar a una economía carbono neutral en 2050, aunque se observa una ligera reducción de las emisiones cerca del rango de 2 t CO₂ee_t.

Tabla 12. Tasas de crecimiento al 2050: Modelo IPAT

VARIABLE/ ESCENARIO	BAU	ESC ORDENADO	ESC DESORDENADO	ESC CRECIMIENTO
PIB	2.80	2.00	2.00	4.00
CE/PIB	-0.61	-3.50	-5.00	-2.00
CO₂ee/CE	0.01	-4.00	-5.30	-2.50
CO₂ee	2.18	-5.50	-8.30	-0.50

Fuente: Elaboración propia con base en la ecuación (2).

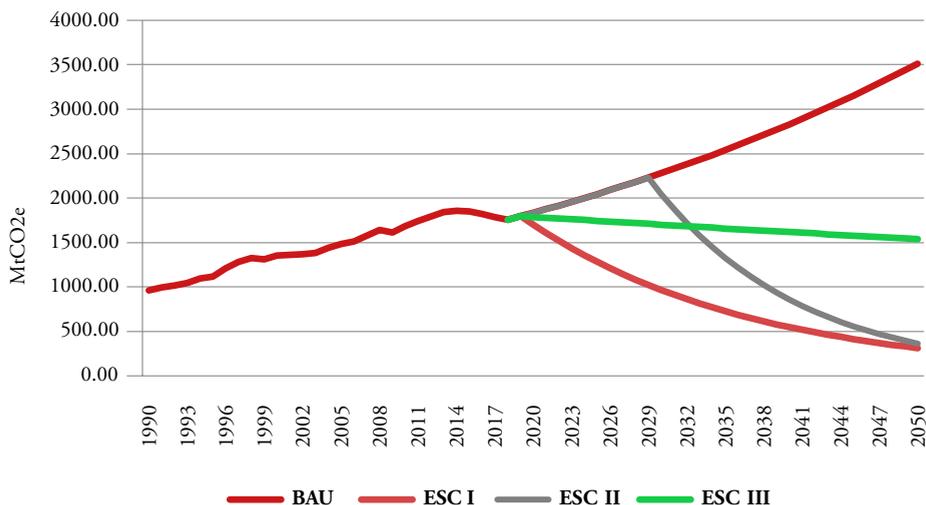
⁵ El escenario de economía carbono neutral supone que las emisiones per cápita del sector energía son menores a 0.5 tCO₂ee atendiendo a que se espera que exista una captura y almacenamientos de captura neto positivo que compense a estas emisiones.

Tabla 13. Escenarios de las emisiones de CO₂ee, a 2050: Modelo IPAT

VARIABLE/ ESCENARIO	BAU	ESC I	ESC II	ESC CRECIMIENTO
CO ₂ ee	3511.56	311.19	361.59	1538.68
CO ₂ eepc	4.61	0.41	0.47	2.02

Fuente: Elaboración propia con base en la ecuación (2).

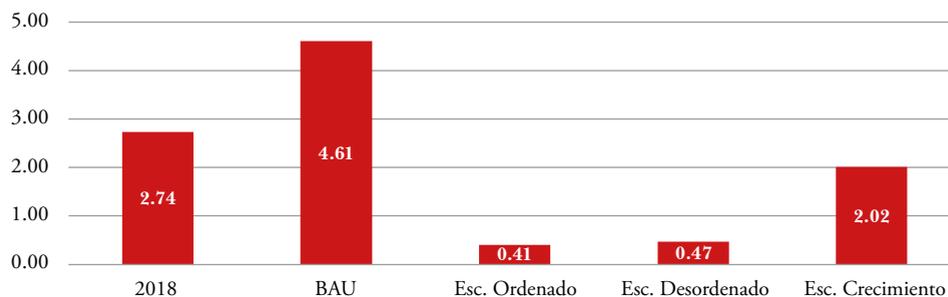
- Los escenarios construidos, con base en el modelo STIRPAT, sintetizados en las Tablas 14 y 15, y las Gráficas 4 y 5 indican que las emisiones provenientes de la energía continuarán aumentando para alcanzar 3308 MtCO₂e que representa alrededor de un poco más de 4 tCO₂e pc en 2050, de mantenerse las actuales elasticidades ecológicas de emisiones de energía a Población, a PIB per cápita y la razón de consumo de energía a PIB. Ello muestra que para construir una economía baja en carbono en América Latina y el Caribe es indispensable desacoplar las elasticidades ecológicas a través de profundos cambios estructurales. Ello debe traducirse en que el aumento de la población debe integrarse en un contexto donde sus demandas de electricidad, transporte y alimentación adicionales estén desacopladas de un incremento de las emisiones de CO₂e.

Gráfica 2. Escenarios de las emisiones de CO₂ee, a 2050: Modelo IPAT

Fuente: Elaboración propia.

Escenarios para la transición energética a una economía carbono neutral en América Latina y el Caribe

Gráfica 3. Escenarios de las emisiones de CO_2ee_t per cápita a 2050: Modelo IPAT



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Niveles y tasas de crecimiento a 2050: Modelo STIRPAT

VARIABLE/ESCENARIO	FMOLS	DOLS
Niveles		
pob_t	1.60	1.86
pibpc_t	0.59	0.46
$(\text{ce}/\text{pib})_t$	0.44	0.53
CO_2ee_t	1.92	1.99
Tasas de crecimiento promedio anual		
pob_t	1%	1%
pibpc_t	1%	1%
$(\text{ce}/\text{pib})_t$	-0.60%	-0.60%
CO_2ee_t	1.92%	1.99%

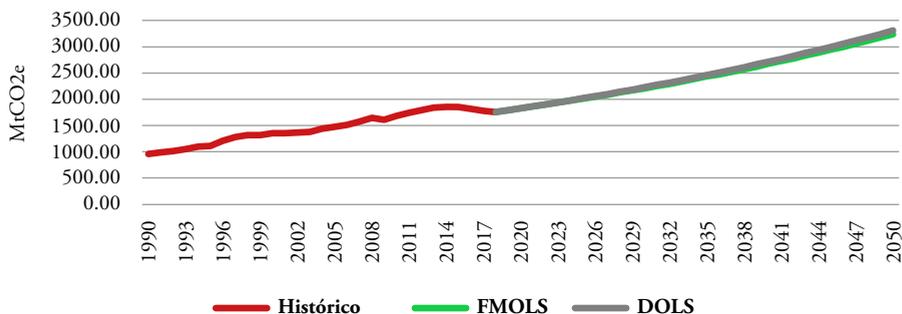
Fuente: Elaboración propia con base en la ecuación (4).

Tabla 15. Escenarios de las emisiones de CO_2ee_t a 2050: Modelo STIRPAT

VARIABLE/ESCENARIO	FMOLS	DOLS
CO_2ee_t	3,236.06	3,308.62
CO_2ee_t	4.24	4.34

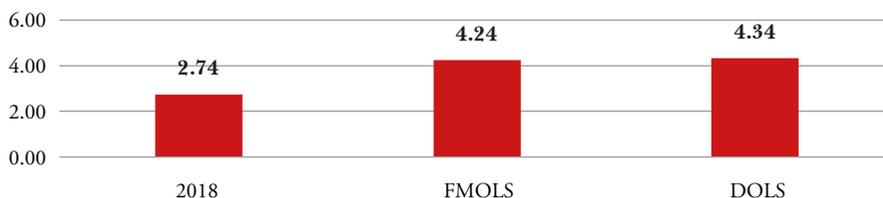
Fuente: Elaboración propia con base en la ecuación (4).

Gráfica 4. Escenarios de emisiones de CO₂ee: Modelo STIRPAT



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 5. Escenarios de emisiones de CO₂ee per cápita: Modelo STIRPAT



Fuente: Elaboración propia.

- Los escenarios construidos con base en la EKC invertida indican que el punto de inflexión se alcanzará entre 11 mil y 12 mil dólares per cápita, junto con un proceso de convergencia de las emisiones per cápita provenientes del consumo de energía. Los escenarios elaborados sugieren que este nivel de PIB per cápita en América Latina y el Caribe se asocia con el punto de inflexión que corresponde a 2042-2050, bajo el supuesto de una tasa de crecimiento promedio anual de 1% del PIB per cápita. En este sentido, una parte importante del proceso de mitigación tendrá que ocurrir antes de que se alcance el punto de inflexión de las emisiones per cápita.

Estos escenarios sobre la evolución de las emisiones de CO₂ee en América Latina y el Caribe no cumplen con las metas de descarbonización del Acuerdo de París de Cambio Climático, a pesar de la reducción reciente (UN, 2020). De este modo,

estos escenarios prospectivos elaborados a 2050 permiten identificar la urgencia y la magnitud de los esfuerzos de mitigación necesarios, y sugieren que es indispensable que la región instrumente una intensa y amplia descarbonización. La magnitud de este proceso de mitigación no es consistente con la evolución reciente y, más aún, con las metas establecidas en las Contribuciones Nacionalmente Determinadas en la región.

Las emisiones del consumo de energía en América Latina y el Caribe proviene, fundamentalmente, de la generación de energía y del transporte (Tabla 16). Ello refleja la presencia de elevadas elasticidades ingreso de la demanda de electricidad y de las gasolinas y una baja elasticidad precio de la demanda de estas demandas (Galindo et al., 2021). En este sentido, para controlar las emisiones de estos sectores es necesario que (IEA, 2021; IPCC, 2018):

- El conjunto de la generación de energía, en particular la energía eléctrica, sea generada con energías renovables.
- El uso de la energía eléctrica, basada en energías renovables, se extienda al conjunto de la economía.
- La electrificación del transporte y la utilización del transporte público se generalicen.
- Precios al carbono que penalicen el uso de los combustibles fósiles y promuevan el uso de las energías renovables.

Tabla 16. Estructura y tasas de crecimiento de las fuentes de emisiones provenientes del sector energético

Subsector	Participación %	TCMA % 1990-2018
Transporte	34.05	2.66
Otros combustibles	6.70	2.08
Manufactura y construcción	14.86	1.23
Emisiones fugitivas	7.76	1.26
Electricidad/calor	30.66	2.85
Edificios	5.96	1.07
Sector energético total	100.00	2.18

Fuente: Elaboración propia con con datos del CAIT-WRI.

5. Conclusiones

Los escenarios presentados muestran que alcanzar la meta de una economía carbono neutral en 2050, en América Latina y el Caribe, requiere instrumentar modificaciones estructurales al actual estilo de crecimiento, de manera urgente y de gran envergadura, a pesar de algunos avances recientes. Retrasar estos procesos de mitigación a 2030 implica aplicar tasas de mayor eficiencia energética y de descarbonización de la economía que parecen poco probables y, además, para instrumentar estos procesos de mitigación a fin de alcanzar la carbono neutralidad es necesario desacoplar la estrecha asociación positiva entre las emisiones de GEI provenientes del consumo de energía, de la población, del PIB y del consumo de energía. En este sentido, retrasar los procesos de mitigación a 2030 implica, también, aumentar sus costos y reducir la probabilidad de su cumplimiento.

En este contexto, es necesario, por ejemplo, instrumentar un intenso proceso de mitigación de las emisiones que provienen del consumo de energía a través de la generación de electricidad basada en energías renovables, el fomento al uso de una movilidad baja en carbono (con privilegio del transporte público), difusión del uso de la electricidad al conjunto de las actividades económicas y patrones de consumo consistentes en huellas de carbono bajas (Fay et al., 2015; IEA, 2021).

Estos procesos de mitigación requieren instrumentar políticas públicas que fomenten el crecimiento, al mismo tiempo que lo desacoplen de las generaciones de emisiones de CO₂e, atendiendo a que la evidencia internacional muestra que los procesos de desacoplamiento son más intensos en países con mayor desarrollo, que apoyan a las energías renovables y disponen de políticas de cambio climático (Cohen et al., 2018). En efecto, la evidencia muestra que existen importantes, aunque heterogéneos, procesos de mitigación en los países desarrollados. Por ejemplo, hay una tendencia a impulsar un precio al carbono a través de impuestos verdes o de sistemas de derechos de emisiones (ETS), en particular en Europa (World Bank, 2017). Sin embargo, estas medidas son insuficientes para alcanzar una economía carbono neutral a 2050 (Carbon Tracker Initiative, 2021).

Este estudio tiene diversas limitaciones donde destaca que la incorporación de las sensibilidades de respuesta de los agentes económicos está aún limitada, y que no se incorporan procesos de interacción entre las diversas opciones de mitigación (por ejemplo, la transición demográfica). En este sentido, es necesario profundizar en la construcción de escenarios de mitigación más detallados y profundos (NGFS, 2021).

Referencias

- Akimoto, K., Sano, F., Homma, T., Tokushige, K., Nagashima, M. y Tomoda, T. (febrero de 2014). Assessment of the emission reduction target of halving CO₂ emissions by 2050: Macrofactors analysis and model analysis under newly developed socio-economic scenarios. *Energy Strategy Reviews*, 2(3-4), 246-256.
- Ajmi, A. N., S. Hammoudeh, D. K. Nguyen y Sato, J. R. (2015). On the relationship between CO₂ emissions, energy consumption and income: the importance of time variation. *Energy Economics*, 49, 629-638.
- Alcántara, V. (2009). Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en España. *Papeles de Economía Española*, 121, 88-99.
- Alcántara, V. y Padilla, E. (2010). Determinantes del crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero en España (1990-2007). *Revista Galega de Economía*, 19(1).
- Bargaoui, S. A., Liouane, N. y Nouri, F. Z. (2014). Environmental impact determinants: An empirical analysis based on the STIRPAT model. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 109, 449-458.
- Barro, R. J. y Sala i Martin, X. (2009). *Crecimiento económico*. Barcelona: Editorial Reverté.
- Britton, E., Fisher, P. y Whitley, J. (febrero de 1998). The Inflation Report Projections: Understanding the Fan Chart. *Bank of England Quarterly Bulletin*, 30-36.
- Burke, P., Shahiduzzaman, M. y Stern, D. (2015). Carbon dioxide emissions in the short run: the rate and sources of economic growth matter. *Global Environmental Change*, 31, 109-121.
- Carbon Tracker Initiative (2021). <https://carbontracker.org/?lang=es>
- Cohen, G., Jalles, J. T., Loungani, P. y Marti, R. (2018). The long run decoupling emissions and output: Evidence from the largest emitters. *Energy Policy*, 118, 58-68.
- Cole, M. A. y Neumayer, E. (2004). Examining the impact of demographic factors on air pollution. *Population and Environment*, 26(1), 5-21.
- Dell, M., Jones, B. F. y Olken, B. A. (2014). What Do We Learn from the Weather? The New Climate-Economy Literature. *Journal of Economic Literature*, 52 (3), 740-98.

- Deryugina, T. y Hsiang, S. M. (2014). *Does the environment still matter? Daily temperature and income in the United States* (No. w20750). National Bureau of Economic Research.
- Dickey, D. A. y Fuller, W. A. (1981). Likelihood Ratio Statistics for Autoregressive Time Series with a Unit Root. *Econometrica*, 49(4), 1057-1072.
- Dijkgraaf, E. y Vollebergh, H. R. J. (2005). A Test for Parameter Homogeneity in CO₂ Panel EKC Estimations. *Environ Resource Econ*, 32, 229-239. <https://doi.org/10.1007/s10640-005-2776-0>
- Duro, J. A., & Padilla, E. (2011). Inequality across countries in energy intensities: An analysis of the role of energy transformation and final energy consumption. *Energy Economics*, 33(3), 474-479.
- Ekins, P. (2000). *Economic growth and environmental sustainability*. Routledge.
- Engle, R. y Granger, C. (1987). Co-integration and error correction: representation, estimation, and testing. *Econometrica*, 55(2), 251-276.
- Fan, Y., Liu, L-C. Wu, G. y Wei, Y-M. (2006). Analyzing impact factors of CO₂ emissions using STIRPAT model. *Environmental Impact Assessments Review*, 26(4), 377-395.
- Fay, M., Hallegatte, S., Vogt-Schilb, A., Rozenberg, J., Narloch, U. y Kerr, T. (2015). *Decarbonizing Development: Three Steps to a Zero-Carbon Future*. *Climate Change and Development*. Washington, DC: World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/21842>
License: CC BY 3.0 IGO
- Galindo, L. M., Caballero, K. y Francisco, C. A. (2021). La demanda de electricidad residencial y el cambio climático em Argentina, Brasil, Chile y Colombia. *Revista Chilena de Economía y Sociedad*, 15(2). <https://rches.utem.cl/articulos/la-demanda-de-electricidad-residencial-y-el-cambio-climatico-en-argentina-brasil-chile-y-colombia/>
- Gómez, M. y Rodríguez, J. C. (2020). Análisis de la curva ambiental de Kuznetz en los países del TLCAN, 1971-2014. *EconoQuantum*, 17(2). <https://doi.org/10.18381/eq.v17i2.7151>
- Gutman, V. y Gutman, A. (2017). *Emisiones energéticas de identidad de Kaya: Nota metodológica*. Buenos Aires: Fundación Torcuato Di Tella.
- Hassan, M. (2016). Urbanization and CO₂ emission in Bangladexch: The application of STIRPAT model. A paper presented at the Insearch, 2016:3rd.
- Heil, M. T. y Selden, T. M. (2001). Carbon emissions and economic development: future trajectories based on historical experience. *Environment and Development Economics*, 6, 63-83.

- IEA (International Energy Agency) (2021). *World Energy Outlook 2021*. https://iea.blob.core.windows.net/assets/599abf72-a686-4786-9cc2-b05e05b8dc2b/WEO2021_ES_Spanish.pdf
- Im, K., Pesaran, M. H. y Shin Y. (1995) (1a. revisado en diciembre 1997). *Testing for Unit Roots in Heterogeneous Panels*, 1a. versión de 1995, 9526 Working Paper. Department of Applied Economics, University of Cambridge.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático) (2018). Summary for Policymakers. *Global Warming of 1.5°C*. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J. B. R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M. I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M. y Waterfield T. (eds.)]. Ginebra: World Meteorological Organization, 32 pp.
- Johansen, S. (1988). Statistical analysis of cointegration vectors. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2-3, 231-254.
- Johansen, S. (1995). *Likelihood-based Inference in Cointegrated Vector Autoregressive Models*. Oxford: Oxford University Press.
- Kao, C. (1999). Spurious Regression and Residual-Based Tests for Cointegration in Panel Data. *Journal of Econometrics*, 90(1), 1-44.
- Kao, C. y Chiang, M. (2000). On the estimation and inference of a cointegrated regression in panel data. En B. Baltagi, (ed.), *Nonstationary Panels, Panel Cointegration, and Dynamic Panels*, *Advances in Econometrics* (pp. 161-178), vol. 15. Amsterdam: JAI Press.
- Kristrom, B. y Lundgren, T. (2005). Swedish CO₂-emissions 1900-2010: an exploratory note. *Energy Policy*, 33(9), 1223-1230.
- Kwiatkowsky, D., Phillips, P. B. C., Schmidt, P. y Shin, Y. (1992). Testing the Null Hypothesis of Stationarity Against the Alternative of a Unit Root: How Sure Are We That Economic Time Series Have a Unit Root? *Journal of Econometrics*, 54(1-3), 159-178.
- Labandeira, X. y Carmelo, J. L. (2007). *Economía ambiental*. España: Pearson Prentice Hall.

- Levin, A y Lin, C. F. (mayo de 1992). Unit Root Tests in Panel Data: Asymptotic and Finite-Sample Properties. UC San Diego Working Paper, 92-93.
- Liddle, B. (2011). Consumption- driven environmental impact and age structure change in OECD countries: A cointegration- STIRPAT analysis. *Demographic Research*, 24, 749-770.
- Liddle, B. y Lung, S. (2010). Age-structure, urbanization, and climate change in developed countries: revisiting STIRPAT for disaggregated population and consumption-related environmental impacts. *Population and Environment*, 31(5), 317-343.
- Lin, S., Shao, D. y Marinova, D. (2009). Analysis of the environmental impact of China based on STIRPAT model. *Environmental Impact Assessment Review*, 29(6), 341-347.
- Lohwasser, J., Schaffer, A. y Brieden, A. (diciembre de 2020). The role of demographic and economic division on the environment in traditional and standardized STIRPAT model. *Ecological Economics*, 178.
- Maddala, G. y Wu, S. (1999). A comparative study of unit root tests with panel data and a new simple test. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 61(S1), 631-652.
- Morita, T., Nakićenović, N. y Robinson, J. (2000). Overview of mitigation scenarios for global climate stabilization based on new IPCC emission scenarios (SRES). *Environ Econ Policy Stud*, 3, 65-88. <https://doi.org/10.1007/BF03354031>
- McCoskey, S. y Kao, C. (1999). A Monte Carlo comparison of tests for cointegration in panel data. Available at SSRN 1807953.
- Martínez-Zarzoso, I., Bengochea-Morancho, A. y Morales-Lage, R. (2007). The impact of population on CO₂ emissions: evidence from European countries. *Environmental and Resource Economics*, 38(4), 497-512.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., Vries, B. d., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T. Y., Kram, T., Rovere, E. L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., Rooijen, S. v., Victor, N., & Dadi, Z. (2000). IPCC: Special Report on Emissions Scenarios.
- Narayan, P. y Narayan, S. (2010). Carbon dioxide emissions and economic growth: panel data evidence form developing countries. *Energy Policy*, 38(1), 661-666.

- NGFS (Network for Greening the Financial System) (2021). NGFS climate scenarios for central banks and supervisors. Network for Greening the Financial System.
- Nguyen, P. (2005). Distribution Dynamics of CO₂ emissions. *Environmental and Resource Economics*, 32, 495-508. doi 10.1007/s10640-005-7687-6
- Nickell, S. (1981). Biases in dynamic models with fixed effects. *Econometrica: Journal of the econometric society*, 1417-1426.
- Pao, H. T. y Tsai, C. M. (2011). Modeling and forecasting the CO₂ emissions, energy consumption and economic growth in Brazil. *Energy*, 36(5), 2450-2458. doi:10.1016/J.energy201601.032
- Pedroni, P. (1999). Purchasing Power Parity Tests in Cointegrated Panels. Working Paper, Department of Economics, Indiana University.
- Pedroni, P. (2004). Panel cointegration: asymptotic and finite sample properties of fooled time series tests with an application to the PPP hypothesis. *Econometric Theory*, 20(3), 597-625.
- Phillips, P. C. y Hansen, B. E. (1990). Statistical inference in instrumental variables regression with I (1) processes. *The Review of Economic Studies*, 57(1), 99-125.
- Phillips, P. C. y Moon, H. R. (1999). Linear regression limit theory for nonstationary panel data. *Econometrica*, 67(5), 1057-1111.
- Phillips, P. C. y Perron, P. (1988). Testing for Unit Root in Time Series Regression. *Biometrika*, 75 (2), 335-346.
- Quah, D.T. (1997). Empirics for growth and distribution stratification, polarization and convergence clubs. *Journal of Economic Growth*, 2, 27-59.
- Ritchie, H. y Roser, M. (2018). Urbanization. *Our world in data*. <https://ourworldindata.org/urbanization>
- Salim, R., Rafiq, S. y Shafiei, S. (2017). Urbanization, energy consumption and pollutant emissions in Asian developing economies. An empirical analysis. Technical Report, ADBI, Working Paper Series.
- Salim, R., Yao, Y. y Chen, G. S. (2017). Does human capital matter for energy consumption in China? *Energy Economics*, 67, 49-59.
- Samaniego, J. L. y Galindo, L. M. (2009). Escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero asociados a combustibles fósiles en América Latina. *Economía Informa*, 360, 40-66.
- Sandoval, E. (2013). Proyección sobre energía eléctrica en México mediante la identidad de Kaya. *Economía Informa*, 380, 41-53.

- Shi, A. (2003). The impact of population pressure on global carbon dioxide emissions, 1975–1996: evidence from pooled cross-country data. *Ecological economics*, 44(1), 29-42.
- Singh, M. y Mukherjee, D. (2018). Drivers of greenhouse gas emissions in the United States: revisiting STIRPAT model. *Environmental development and Sustainability*, 21, 3015–3031.
- Strazicich, M. C. y List, J. A. (2003). Are CO₂ emissions levels converging among industrial countries. *Environmental and Resource Economics*, 24, 263-271.
- Tursun, H., Li, Z., Liu, R., Li, Y. y Wang, X. (2014). Contribution weight of engineering technology on pollutant emission reduction based on IPAT and LMDI methods. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17, 225-235. 10.1007/s10098-014-0780-1.
- Van Ruijven, B. J., Daenzer, K., Fisher-Vanden, K., Kober, T., Paltsev, S., Beach, R. H., Calderon, S.L., Calvin, K., Labriet, M., Kitous, A. et al. (2016). Baseline projections for Latin America: base year assumptions, key drivers and greenhouse emissions. *Energy Economics*, 56, pp. 499-512.
- Vide, J. M. (2007). *Aspectos económicos del cambio climático en España*. Barcelona: Caixa Catalunya.
- World Bank (1992). *World Development Report, 1992*. Oxford/Nueva York: Oxford University Press.
- World Bank; Ecofys, Vivid Economics (2017). *State and Trends of Carbon Pricing*. Washington, DC: World Bank.
- WRI (World Resources Institute) (2021). *CAIT Climate Data Explorer*. <http://cait.wri.org/>
- Yan, W, Yi, W. y Yu, B. (2016). The change of the relationship between CO₂ emissions and the driving forces—Quantile regression based on STIRPAT model—. *Environmental Science*.
- York, R., Rosa E. A. y Dietz, T. (2003). STIRPAT, IPAT and impact; analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. *Ecological Economics*, 46(3), 351-365.

APÉNDICE

Tabla 1.A. Países incluidos en el análisis

Código	País	Código	País
ATG	Antigua y Barbuda	HTI	Haití
ARG	Argentina	HND	Honduras
BHS	Bahamas	JAM	Jamaica
BRB	Barbados	MEX	México
BLZ	Belice	NIC	Nicaragua
BOL	Bolivia	PAN	Panamá
BRA	Brasil	PRY	Paraguay
CHL	Chile	PER	Perú
COL	Colombia	DOM	República Dominicana
CRI	Costa rica	URY	Uruguay
CUB	Cuba	KNA	Saint Kitts y Nevis
DMA	Dominica	VCT	San Vicente y Las Granadinas
ECU	Ecuador	LCA	Santa Lucía
SLV	El Salvador	SUR	Suriname
GRA	Granada	TTO	Trinidad y Tobago
GTM	Guatemala	VEN	Venezuela
GUY	Guyana		

Fuente: Elaboración propia con base en <https://country-code.cl/es/>

Tabla 2.A. Base de datos

Variable	Unidad de Medida	Fuente	Variable	Unidad de Medida	Fuente
CO2eTOTALES	MtCO2e	CAIT-WRI	PIB INDUSTRIAL	US\$ a precios constantes de 2012	Banco Mundial
CO2eTOTALES	MtCO2e	CAIT-WRI	PIB PER CAPITA	US\$ a precios constantes de 2013	Banco Mundial
PIB	US\$ a precios constantes de 2010	Banco Mundial	CONSUMO DE ENERGÍA	Miles de barriles equivalentes de petróleo	cepalStat con base en OLADE
PIB AGROPECUARIO	US\$ a precios constantes de 2011	Banco Mundial	Población		Base de Datos CEPAL

Fuente: Elaboración propia.

Escenarios prospectivos

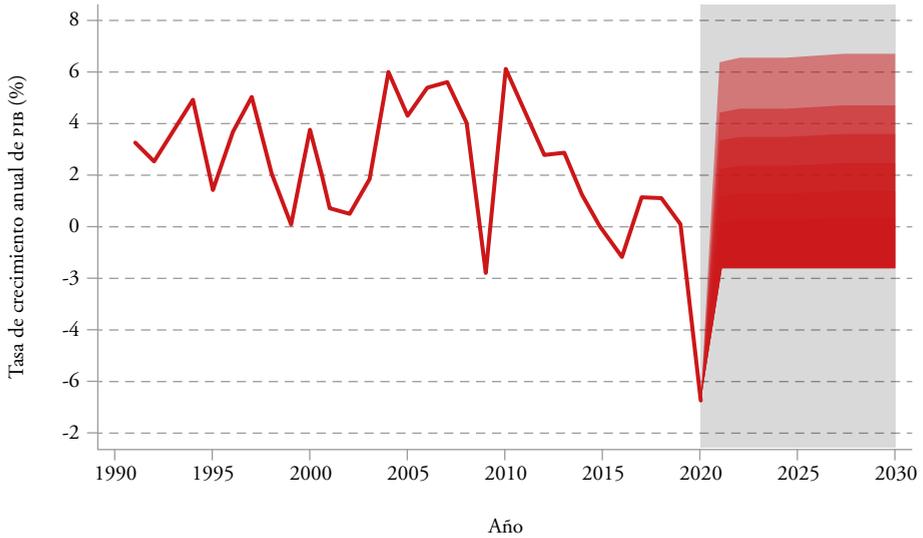
Los escenarios para el PIB_t, PIBpc_t de América Latina y el Caribe se realizan con base en la estimación de modelos ARIMA y en sus respectivos abanicos de probabilidad condicional (*Fan chart*) (Britton et al., 1998). Los escenarios de PIB y PIBpc se sintetizan en las Gráficas 1.A y 2.A y en las Tablas 1.A y 2.A. Estos escenarios indican que las tasas de crecimiento promedio anual se ubicarán alrededor de 2% hasta 2030. Para los escenarios a 2050 se mantiene la misma trayectoria inercial.

Los escenarios poblacionales se obtienen de las proyecciones realizadas por el Department of Economic and Social Affairs (ONU, 2019) (Tabla 3A).

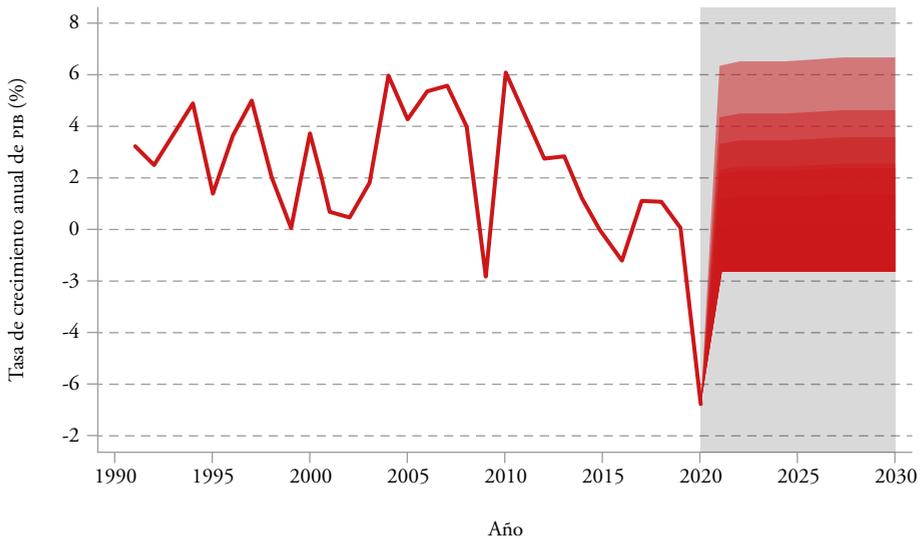
**Tabla 3A. Escenarios poblaciones para América Latina y el Caribe a 2050
(miles de habitantes)**

	2020	2030	2040	2050
Población	653 962.332	706 254.029	742 347.826	762 432.299

Gráfica 1.A. Escenarios de la tasa de crecimiento promedio anual del PIB de América Latina y el Caribe a 2030



Gráfica 2.A. Tasa de crecimiento anual del PIB de América Latina 1990-2030



Nota: Se utiliza 1990-2019 para la estimación.