



CAMBIO CLIMÁTICO, CONVERGENCIA ECONÓMICA REGIONAL Y EFECTOS
ESPACIALES: NUEVA EVIDENCIA EMPÍRICA PARA COLOMBIA

CLIMATE CHANGE, REGIONAL ECONOMIC CONVERGENCE, AND SPATIAL
EFFECTS: NEW EMPIRICAL EVIDENCE FOR COLOMBIA

CARLOS ALBERTO ASTUDILLO MENDOZA

Trabajo de Grado para optar al título de Magister en Economía Aplicada

Asesor: Juan Manuel Aristizabal Tamayo

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE FINANZAS, ECONOMÍA Y GOBIERNO
MAESTRÍA EN ECONOMÍA APLICADA
MEDELLÍN
2024

Resumen

El estudio analiza los efectos del cambio climático sobre el crecimiento económico y los procesos de convergencia regional condicional en Colombia durante la última década. A través de modelos de panel aplicados a 32 departamentos en el periodo 2008-2019, se incorporan variables climáticas y se modela la dependencia espacial para captar tanto los efectos directos como indirectos del clima sobre el crecimiento económico y la convergencia interregional. Tres hallazgos principales destacan en los resultados: (1) la interacción entre la desviación de la temperatura media departamental y la convergencia, con un coeficiente estimado entre -0.03 y -0.044, sugiere que las variaciones de temperatura han afectado de forma más pronunciada el crecimiento económico de los departamentos más desarrollados; (2) se observan no linealidades en la relación clima-crecimiento, con un umbral de desviación de 0.32 °C respecto a la media histórica, a partir del cual se identifican efectos negativos sobre el crecimiento; y (3) la presencia de efectos de derrame espacial, donde las variaciones climáticas en un departamento impactan el desempeño económico de las regiones vecinas. Estos hallazgos contribuyen a comprender cómo el cambio climático influye en los patrones de crecimiento y convergencia a nivel regional, subrayando la importancia de implementar medidas de mitigación y adaptación que consideren tanto los efectos locales como las interdependencias regionales y los umbrales críticos identificados en el análisis (0.32°C).

Palabras Clave: Cambio climático, convergencia económica regional, dependencia espacial, países en desarrollo.

Abstract

The study analyzes the effects of climate change on economic growth and conditional regional convergence processes in Colombia over the past decade. Using panel models applied to 32 departments over the 2008-2019 period, climate variables are incorporated, and spatial dependence is modeled to capture both the direct and indirect effects of climate on economic growth and interregional convergence. Three main findings emerge from the results: (1) the interaction between the deviation from departmental average temperature and convergence, with an estimated coefficient between -0.03 and -0.044, suggests that temperature variations have more significantly impacted economic growth in the more developed departments; (2) evidence of nonlinearities in the climate-growth relationship, with an optimal deviation threshold of 0.32 °C from the historical average, beyond which negative effects on growth are observed; and (3) the presence of spatial spillover effects, where climatic variations in one department impact the economic performance of neighboring regions. These findings contribute to understanding how climate change influences regional growth and convergence patterns, highlighting the importance of implementing mitigation and adaptation measures that consider both local effects and regional interdependencies, as well as the critical thresholds identified in this analysis (0.32°C).

Keywords: Climate change, regional economic convergence, spatial dependence, developing countries.

Contenido

Resumen	2
Abstract.....	3
1. Introducción	6
2. Revisión de literatura	8
3. Área de estudio.....	10
3.1. Colombia y su diversidad regional	10
3.2. Datos y evidencia descriptiva.....	13
3.2.1. Crecimiento económico.....	13
3.2.2. Cambio climático	15
3.2.3. Variables de control.....	18
3.2.4. Evidencia descriptiva.....	20
4. Metodología	24
5. Resultados y discusión	25
5.1. Estimaciones.....	25
5.2. Efectos directos e indirectos	31
6. Conclusiones	32
7. Bibliografía	33
8. Anexos	40

Índice de tablas

Tabla 1. Indicadores económicos y sociales y ambientales en Colombia y otros países	10
Tabla 2. Estadística descriptiva: producto per cápita.....	13
Tabla 3. Estadística descriptiva: variables climáticas	15
Tabla 4. Estadística descriptiva: variables de control	19
Tabla 5. Modelos de datos de panel espacial	25
Tabla 6. Estimaciones de modelos de crecimiento a partir de datos de panel espacial	26
Tabla 7. Efectos indirectos directos e indirectos de las regresiones SAR, SAC y SDM	31
Tabla 8. Estimaciones de modelos de crecimiento a partir de datos de panel espacial: regresión completa	40
Tabla 9. prueba F restringida	41
Tabla 10. Test de Hausman	41
Tabla 11. Test de Hausman para modelos espaciales	42
Tabla 12. Efectos indirectos directos e indirectos de las regresiones SAR, SAC y SDM: Estimaciones completas	42

Índice de gráficos

Gráfico 1. Evolución del del producto per cápita a nivel departamental 2008 - 2019.....	14
Gráfico 2. Temperatura media en los departamentos de Colombia 2008 - 2019 (°C)	16

Gráfico 3. Desviación de la temperatura (con respecto a la media móvil de 3 años) en los departamentos de Colombia 2008 – 2019 (°C).....	17
Gráfico 4. Precipitación anual en los departamentos de Colombia 2008 – 2019 (mm).....	18
Gráfico 5. Evolución del Coeficiente de Variación, el Índice de Moran y Coeficiente de Geary para el producto per cápita (\$/hab), la temperatura media (°C) y la precipitación total (mm)	21
Gráfico 6. Mapa de agrupaciones de Moran de las asociaciones espaciales locales entre temperatura media y PIB per cápita a nivel departamental.....	22
Gráfico 7. Mapa de agrupaciones de Moran de las asociaciones espaciales locales entre la precipitación anual y el PIB per cápita a nivel departamental.....	23
Gráfico 8. Relación entre la desviación de la temperatura media y el crecimiento económico	27
Gráfico 9. Relación entre las precipitaciones y el crecimiento económico	29

1. Introducción

La convergencia económica es un concepto basado en una relación negativa entre el stock de capital y el crecimiento, lo que implica que las economías con menor capital tienden a crecer más rápido (Solow, 1956; Swan 1956). Sin embargo, esta idea de convergencia absoluta fue ajustada para considerar que la convergencia en las tasas de crecimiento se presenta solo al controlar factores determinantes del estado estacionario, como instituciones y capital humano, que influyen en la función de producción (Barro & Sala-i-Martin, 1991; Mankiw, Romer, & Weil, 1992).

Si bien este concepto ha sido ampliamente discutido, abordándose desde diferentes marcos metodológicos y utilizando diferentes bases de datos; poco se sabe sobre los efectos que puede tener el cambio climático sobre los procesos de convergencia, tanto a nivel internacional como a nivel regional; que como se sabe, representa uno de los grandes retos que afrontan las sociedades (Paglialunga, et al., 2022).

La literatura ha sugerido varios mecanismos a través de los cuales la temperatura puede influir en los resultados económicos, como la productividad agrícola (Gornall et al., 2010; Ayinde et al., 2011; Ortiz et al., 2021), la productividad industrial, la inflación (Brunner, 2002; Mukherjee & Ouattara, 2021), y otros aspectos como la mortalidad, el rendimiento cognitivo e incluso, la inestabilidad política (Dell et al., 2012). Sin embargo, existe evidencia limitada y contradictoria sobre si el efecto del cambio climático en los patrones de convergencia internacional tiende a ampliar las brechas (Dell et al., 2012; Baarsch et al., 2020) o a reducirlas (Berg et al., 2023).

Además, los estudios que centran su análisis en países en vías de desarrollo son limitados (Narayan & Narayan, 2010; Abidoye & Odusola, 2015; Henseler & Schumacher, 2019); y existe un vacío notable en la investigación empírica que explora cómo el cambio climático influye en la convergencia económica a nivel interregional (Baarsch et al., 2020; Henseler & Schumacher, 2019).

En este contexto, la principal motivación para desarrollar este trabajo, corresponde al abordaje de dicha brecha, tomando como caso de estudio a Colombia, un país en desarrollo con marcadas heterogeneidades regionales geográficas, climáticas y socioeconómicas; que si bien ha dado pasos importantes en la reducción de la pobreza, sigue siendo caracterizado como el segundo país más desigual de América Latina, después de Brasil, con un índice de Gini (0,529) muy superior a la media de los países OCDE (0,316) en 2019 (Duque, et al., 2023); y con desigualdades regionales que son 42 veces mayores que en Australia y más de 5 veces mayores que en Canadá o Estados Unidos (Ídem).

El objetivo principal es estimar los efectos del cambio climático sobre el crecimiento económico y, en particular, sobre los procesos de convergencia condicional en los departamentos colombianos

durante la última década. Para ello, se estiman modelos de panel para 32 departamentos de Colombia (incluyendo Bogotá) en el periodo 2008-2019, incorporando variables climáticas en diversas especificaciones.

A su vez, dado que las regiones no operan de manera aislada y sus interacciones, influenciadas por la proximidad geográfica, impactan los resultados económicos (Moncada & Loaiza, 2013) y el comportamiento de variables sociales (Royuela & García, 2013), y considerando que el clima también sigue patrones espaciales (Auffhammer et al., 2013), los modelos se amplían mediante la modelación de la dependencia espacial en diferentes especificaciones, para capturar los efectos indirectos del cambio climático sobre el crecimiento y la convergencia intrarregional en Colombia.

En el presente estudio, se documenta un hecho ya estilizado en Colombia: la evidencia de procesos de convergencia regional condicionada durante el período analizado, con una velocidad de ajuste estimada del 9-10% (Aristizábal y García, 2020). Además, emergen tres hallazgos clave que permiten mejorar la comprensión de la relación entre el clima y los patrones de crecimiento regional, lo que puede contribuir así al diseño de instituciones y políticas regionales orientadas al desarrollo y la adaptación al cambio climático.

Primero, se destaca la interacción entre la desviación de la temperatura media departamental y la variable de convergencia, con un coeficiente estimado entre -0.03 y -0.044, lo cual sugiere que, durante el período analizado, los cambios en la temperatura afectaron más a los departamentos más desarrollados, con un mayor producto per cápita, en comparación con los departamentos más pobres. Esto indica que, en el período analizado, la temperatura tuvo un efecto pro-convergente.

En segundo lugar, el estudio aporta al entendimiento de los efectos del cambio climático sobre los procesos de crecimiento al presentar evidencia de no linealidades entre el cambio climático y el crecimiento económico regional en Colombia. No se confirma un nivel óptimo de temperatura, como documentaron Burke, Hsiang y Miguel (2015), sino se estima un nivel de desviación óptimo respecto a la temperatura media histórica, similar al hallazgo de Baarsch et al. (2020). Esta función tiene forma de U invertida, con un punto de inflexión en 0,32 grados centígrados; lo que sugiere que desviaciones superiores a este umbral comienzan a tener efectos negativos sobre el crecimiento. Por último, se observan efectos de derrame espacial, donde las variaciones climáticas en un departamento influyen en el comportamiento económico de las regiones vecinas.

El documento se organiza de la siguiente manera: la sección 2 presenta una revisión de la literatura sobre cambio climático, crecimiento económico y convergencia. En la sección 3 se describe el área de estudio, destacando la heterogeneidad regional de Colombia en términos geográficos, climáticos y económicos, y se presentan los datos junto con algunos estadísticos descriptivos. La sección 4

detalla la estrategia metodológica utilizada, mientras que las secciones 5 y 6 se centran en el análisis de los resultados y la exposición de las conclusiones, respectivamente.

2. Revisión de literatura

Desde la perspectiva de los ingresos, la convergencia económica ha sido ampliamente analizada (Barro & Sala-i-Martin, 1991; Mankiw, et al., 1992; Cárdenas y Pontón, 1995; Bonet y Meisel, 1999; Abreu, et al., 2005; Galvis, et al., 2017). Al respecto, los resultados han dependido de la adopción de diferentes enfoques metodológicos y la naturaleza de los datos empleados (Desli & Gkoulgkoutsika, 2020; Abreu, et al., 2005); siendo el enfoque empírico más popular, el diseño propuesto por Barro y Sala-I-Martin (1992).

En este marco metodológico el concepto de convergencia está fundamentado en tendencias determinísticas. De esta forma, Barro y Sala-I-Martin (1992) probaron la hipótesis de convergencia utilizando datos de varios países de 1960 a 1990. Sus resultados muestran que los países pobres convergieron en crecimiento con los países ricos, sólo después de condicionar las políticas, las instituciones y otros factores específicos del país (Pande y Enevoldsen, 2021). Este enfoque ha sido empleado en investigaciones empíricas tanto en economías desarrolladas (Kotosz y Lengyel, 2017; Park y Mercado, 2017; Ceylan y Abiyev, 2016) como en economías en vías de desarrollo (Díaz, et al., 2017; Szeles y Muñoz, 2016; Galvis y Hahn, 2015; Kuscevic y del Río, 2013).

De otro lado, los efectos del cambio climático sobre el crecimiento económico y la convergencia han recibido menos atención. A nivel global, Kahn y Rashid (2022) examinaron el impacto a largo plazo del cambio climático en 174 países entre 1960 y 2014, sugiriendo que un aumento constante de 0,04 °C por año en la temperatura global podría reducir el PIB real per cápita mundial en más del 7% para 2100. Dell et al. (2012), utilizando un panel de 120 países entre 1950 y 2003, muestran grandes efectos negativos de temperaturas más altas en el crecimiento, pero sólo en los países pobres. Concluyeron que un aumento de 1 °C en la temperatura en un año específico reduce el crecimiento económico en promedio 1,3 puntos porcentuales en países pobres, afectando la producción agrícola e industrial y aumentando la inestabilidad política.

De este hallazgo se desprende que los efectos del cambio climático no son uniformes y varían según las regiones (Dell et al., 2012; Cashin et al., 2017; Khan & Rashid, 2022; Berg et al., 2023). A este respecto, Cashin, Mohaddes y Raissi (2017) encontraron que mientras países como Australia, Chile, Indonesia, India, Japón, Nueva Zelanda y Sudáfrica experimentan caídas temporales en la actividad económica, otros como Estados Unidos y la región europea ven un impulso en el crecimiento durante las crisis de El Niño. Por otro lado, Berg et al. (2023) hallaron que, en los países del G7, las respuestas del crecimiento del PIB per cápita a la variación de la temperatura global son negativas,

mientras que las respuestas positivas son más probables en países más pobres, con menor crecimiento, menor nivel educativo, menor apertura comercial y mayor autoritarismo.

En cuanto a la forma funcional de la relación entre la temperatura y el crecimiento económico, Burke, Hsiang y Miguel (2015) mostraron que la productividad económica no varía linealmente con la temperatura, sino que sigue una relación cuadrática. Encontraron que los efectos de la temperatura media sobre el crecimiento económico son positivos hasta un pico alrededor de los 13,6 °C, disminuyendo a temperaturas más altas. Este hallazgo fue respaldado por Henseler y Schumacher (2019), quienes, en un estudio con datos de panel de 103 países para el período 1961-2010, identificaron una relación en forma de U invertida con un punto de inflexión alrededor de los 10 °C. Además, destacaron que el cambio climático contribuye significativamente a la desigualdad internacional, afectando más severamente a los países con menor capacidad para proteger su producción ante el aumento de la temperatura (países con un PIB inferior al percentil 30), lo que convierte al cambio climático en un importante impulsor de la desigualdad internacional.

Se destaca, dentro de la literatura revisada, que Baarsch et al. (2020) es el único estudio que examina el impacto del cambio climático en la convergencia del ingreso. En detalle, Baarsch et al. (2020) construyeron un panel de 35 años entre 1980 y 2014 para todos los países africanos, revelando pérdidas de entre el 10% y el 15% en el crecimiento del PIB per cápita debido a los daños del cambio climático. En cuanto a la convergencia del ingreso, revelaron que en situaciones de calentamiento elevado, este proceso podría retrasarse entre 10 y 19 años con respecto al escenario de referencia (trayectorias socioeconómicas compartidas SSP2).

En cuanto a las técnicas empleadas en el análisis de convergencia, debe anotarse que en su generalidad, los métodos más empleados corresponden a enfoques transversales, análisis de series temporales y paneles de datos (Hsiang 2016). No obstante, diversas investigaciones se han ocupado del estudio del rol de la geografía en los procesos de desarrollo regional (Krugman, 1991; Quah, 1996) y se ha precisado que la ubicación en el espacio incide en las dinámicas económicas; siendo el paper seminal de Rey y Montouri (1999) el que esquematiza la pertinencia de incluir los efectos espaciales para el análisis de la convergencia económica en su análisis del rol de la geografía en los patrones de crecimiento de la renta de los EE.UU en el periodo 1924 – 1999.

Finalmente, esta revisión evidencia que, mientras algunos estudios sugieren que el cambio climático podría ampliar las brechas económicas (Dell et al., 2012; Baarsch et al., 2020), otros argumentan que podría reducirlas (Berg et al., 2023), lo que revela la falta de consenso en la literatura sobre los efectos del cambio climático en los procesos de convergencia económica. Además, la evidencia específica sobre los efectos del cambio climático en las desigualdades regionales en países en vías de desarrollo es limitada.

En este contexto, el presente estudio busca contribuir a esta discusión, ofreciendo resultados para un país en desarrollo como Colombia, caracterizado por una marcada heterogeneidad regional en términos geográficos, climáticos y económicos, y abordando también los efectos de derrame asociados a la dependencia espacial, un aspecto poco explorado en estudios previos (Auffhammer et al., 2013).

3. Área de estudio

3.1. Colombia y su diversidad regional

Para el presente desarrollo se toma como caso de estudio a Colombia, un país sudamericano de ingresos medios estimados para el 2023 en USD 19.470 PPA, con poco más de 52 millones de habitantes distribuidos en un área aproximada de 1,14 millones de km². Es un país donde el 76% de sus habitantes se ubica en zonas urbanas, la esperanza de vida al nacer es de 77 años, el 33% de la población se encuentra por debajo de los niveles de pobreza y el 6% en situación de pobreza extrema, sobreviviendo con menos de US\$2,15 PPA por día; lo que le ha significado para el 2022 un coeficiente de Gini de 54.8. En la Tabla 1 se presentan los indicadores económicos y sociales de Colombia y otros países.

Tabla 1. Indicadores económicos y sociales y ambientales en Colombia y otros países

Concepto	Colombia	Perú	Ecuador	Brasil	Chile	México	USA	Alemania
PIB per cápita (2017 PPA \$) ^a	18,777	15,068	14,305	18,554	29,507	22,367	73,637	61,909
Crecimiento del PIB (anual, %) ^a	0.2	-1.4	1.3	2.4	0.1	2.5	2	-1.1
Población (miles) ^a	52,085	34,352	18,19	216,422	19,629	128,455	334,915	84,482
Coeficiente de Gini ^b	54.8	40.3	45.5	52.0	43	43.5	39.8	31.7
Población que vive por debajo de US\$2,15 PPA por día (%) ^c	6	2.7	3.2	3.5	0.4	1.2	0.2	0
Tasa de desempleo (%) ^d	10.5	4.3	3.8	9.2	8.2	3.3	3.6	3.1
Empleo informal (% del empleo total no agrícola) ^e	50.8	64.9	58.3	33.7	26.3	51.9	-	2.4
Emisiones per cápita de CO2 (toneladas métricas) ^f	1.6	1.7	2.4	2.1	4.6	3.6	15.2	8.5

Notas: PPA: paridad de poder adquisitivo. ^a Los datos se refieren a 2023 (datos del Banco Mundial); ^b Los datos se refieren al año más reciente disponible: 2019 para el caso de Alemania, 2021 en el caso de Estados Unidos y 2022 en todos los demás países (datos del Banco Mundial); ^c Los datos se refieren al año más reciente disponible, 2019-2022 (Banco Mundial, Plataforma sobre Pobreza y Desigualdad); ^d Los datos se refieren a 2022 (datos del Banco Mundial); ^e Los datos se refieren al año más reciente disponible durante el período 2020-2023 (ILOSTAT). ^f Los datos se refieren al 2018 (Climate Watch. 2020).

Con 32 departamentos y 1,103 municipios, Colombia presenta contrastes regionales profundamente marcados. Geográficamente, el país está dividido por la Cordillera de los Andes, que lo cruza de norte a sur, ramificándose en tres cordilleras: oriental, central y occidental. Esta formación montañosa da origen a la región Andina, en el centro del territorio, y divide el país en dos grandes zonas: al este, la Orinoquía en el norte y la Amazonía en el sur; y al oeste, la región Caribe en el norte y la región Pacífica en el sur.

La región Andina, con una extensión de 283.000 km² (equivalente al 24% del territorio nacional), es el corazón económico e industrial del país. Representa el 65% del PIB colombiano, con contribuciones significativas de Bogotá D.C. (25,91%), Antioquia (14,66%) y Santander (6,44%) (Baena et al., 2020). Además, alberga el 48,6% de la producción agrícola y al 56,7% de la población, incluyendo a Bogotá, que cuenta con casi 8 millones de habitantes (DANE, 2015). Esta región, junto con el Caribe, es estratégica por sus páramos, que cubren alrededor del 50% de los páramos del mundo y son estratégicos para el almacenamiento y regulación de aguas superficiales y subterráneas¹. La región Andina también contiene 33 de los 61 sistemas acuíferos identificados en Colombia, ubicados en áreas clave como los valles del Magdalena y las cordilleras Oriental y Occidental (IDEAM, 2015).

Por su parte, la zona oriental comprende la Amazonía, al sur, y la Orinoquía, al norte, dos vastas regiones de selvas y sabanas que, aunque cubren casi el 60% del territorio nacional, solo albergan alrededor del 5% de la población (Meisel & Hahn, 2020). En términos económicos, la Orinoquía, conformada por los departamentos de Arauca, Casanare, Meta y Vichada, ha estado tradicionalmente enfocada en la ganadería extensiva. Sin embargo, en las últimas décadas, su economía se ha diversificado hacia la explotación petrolera y el cultivo extensivo de palma de aceite (Viloria, 2009) (Viloria, 2009), lo que explica la presencia de estos departamentos entre los de mayor ingreso per cápita (ver Gráfico 1).

La Amazonía, que incluye los departamentos de Caquetá, Amazonas, Putumayo, Guainía, Guaviare y Vaupés, es una de las regiones menos prósperas de Colombia. Sus condiciones de vida se encuentran por debajo del promedio nacional, en gran medida debido a su aislamiento geográfico y a las limitaciones para desarrollar economías regionales que fomenten el crecimiento económico (Meisel, Bonilla & Sánchez, 2013). Según Galvis & Meisel (2010), la Amazonía, junto con la Orinoquía y varios departamentos de las costas Caribe y Pacífica, conforman lo que se podría denominar la "periferia económica" del país, presentando indicadores de Necesidades Básicas Insatisfechas superiores al promedio nacional.

¹ Por ejemplo, Bogotá, la capital del país depende para abastecerse de agua en un 70% del páramo cercano al Parque Nacional Chingaza (Cresso, Clerici, & Sánchez, 2020). Sin embargo, el aumento de las temperaturas medias y los cambios en las precipitaciones harán que entre el 39 y el 52 % de la extensión actual de los páramos del Parque Natural Chingaza no sea apta para estos ecosistemas durante la estación seca (Cresso, Clerici, & Sánchez, 2020).

Por otro lado, la región Pacífica, ubicada en la zona occidental del país y delimitada al sur por el Océano Pacífico, abarca más de 80.000 km², lo que equivale al 7% del territorio nacional. Esta región alberga al 2,7% de la población y comprende los departamentos de Chocó, Valle del Cauca (Buenaventura), Cauca y Nariño. Se caracteriza por su densa vegetación selvática, extensas cuencas hidrográficas y altos niveles de precipitación, lo que plantea desafíos significativos para las condiciones de vida y el desarrollo económico (Romero, 2009).

El producto per cápita de esta región es menos de la mitad del promedio nacional y equivale a un tercio del de la región Andina. Aunque la agricultura desempeña un papel importante en su economía, su productividad es baja en comparación con otras regiones (ídem). Adicionalmente, se ha documentado que la pobreza en los departamentos de Cauca, Chocó y Nariño ha sido consistentemente superior al promedio nacional (En 2002, la pobreza en Chocó era 1,4 veces mayor que el promedio nacional, y para 2015, esta proporción se había incrementado a 2,3 veces) (Galvis et al., 2016).

Finalmente, la región Caribe, que abarca 132.000 km² (equivalente al 11,5% del territorio nacional), concentra al 22% de la población y limita con el Océano Atlántico (DANE, 2012). Esta región es notablemente diversa: por un lado, la Depresión Momposina constituye la mayor zona inundable del país (Galvis, 2019); por otro, la Alta Guajira, siendo la más árida, registra los niveles más altos de evapotranspiración a nivel nacional. Además, la región alberga la Sierra Nevada de Santa Marta, la montaña costera más alta del mundo, que es un distintivo geográfico de gran relevancia (ídem).

En términos económicos, Bolívar y Atlántico son los departamentos más destacados, mientras que Cesar se distingue por su producción petrolera, lo que le permite superar la mediana del ingreso nacional (ver Gráfico 1). Respecto a la distribución de la población, Galvis (2019) señala que el 10% de los municipios más grandes concentra el 57% de la población, con una mayor densidad poblacional en municipios ubicados cerca de la frontera marítima y a lo largo de los ríos, lo que aumenta la vulnerabilidad de la región ante eventos extremos de precipitación y sequías.

En resumen, en Colombia los factores geográficos, topográfica sumados a factores históricos, han generado marcadas desigualdades socioeconómicas regionales, lo que ha determinado la formación de polos de crecimiento (Galvis & Meisel, 2013). Aunque el Gráfico 1 revela cambios significativos en el producto per cápita entre 2008 y 2019, no se percibe una redistribución territorial de este. Solo destaca la caída notable del producto per cápita en Arauca, atribuida a la disminución de su producción minera y petrolera (que pasó del 59% en 2008 al 37% en 2019).

La distribución de la producción económica sigue concentrada en el centro del país, así como en los departamentos de Atlántico, Bolívar y Cesar en la región Caribe; Valle del Cauca en la región Pacífica; y los departamentos petroleros de la Orinoquía como Casanare, Meta y Arauca. Al mismo

tiempo, persiste el rezago en el noroccidente, específicamente en Sucre, Córdoba, La Guajira, Magdalena y Chocó; en el suroccidente, con Nariño y Putumayo; y en el sur y oriente del país, que abarca los departamentos del Amazonas, Caquetá, Guaviare, Vaupés, Guainía y Vichada.

3.2. Datos y evidencia descriptiva

La base de datos a emplear en este trabajo incluye un panel de datos para 32 departamentos de Colombia², que comprende observaciones para un periodo de once años, desde el 2008 hasta el 2019. Se trata de un panel balanceado $N = 32$ y $T = 12$ con $NT = 384$ observaciones en total.

3.2.1. Crecimiento económico

La variable dependiente corresponde a la tasa de crecimiento del producto per cápita y se calcula a partir de las cuentas nacionales departamentales publicadas por el Departamento Nacional de Estadística (DANE). Para ello, se toma el producto per cápita por departamento en pesos constantes del 2015 (Y_t), se calcula su logaritmo natural y se estima la tasa de crecimiento como: $Ln(Y_t) - Ln(Y_{t-1})$.

Como variable explicativa, se cuenta introduce el rezago temporal del logaritmo natural del PIB real per cápita $Ln(Y_{t-1})$, a partir del cual se pretende identificar el parámetro de convergencia.

Tabla 2. Estadística descriptiva: producto per cápita

Variable	Año	Media	Sd	P25	Median	P75	Min	Max	CV	Theil
PIB real per cápita (\$Constantes 2015)	2008	11,51	5,79	7,14	10,77	14,56	5,52	25,85	0,50	0,11
	2013	13,33	7,20	7,97	11,53	17,03	5,08	33,10	0,54	0,12
	2019	13,71	7,19	8,44	12,54	17,14	5,25	31,48	0,52	0,12

Fuente: Elaboración propia con base en cuentas nacionales departamentales del DANE.

Respecto al comportamiento de la variable, la Tabla 2 muestra que si bien la media del PIB per cápita departamental creció un 19,11% entre 2008 y 2019; el coeficiente de variación sugiere que las diferencias en el desempeño económico entre departamentos se han mantenido durante el período analizado, por lo que se descarta la existencia de procesos de convergencia absoluta económica en este período.

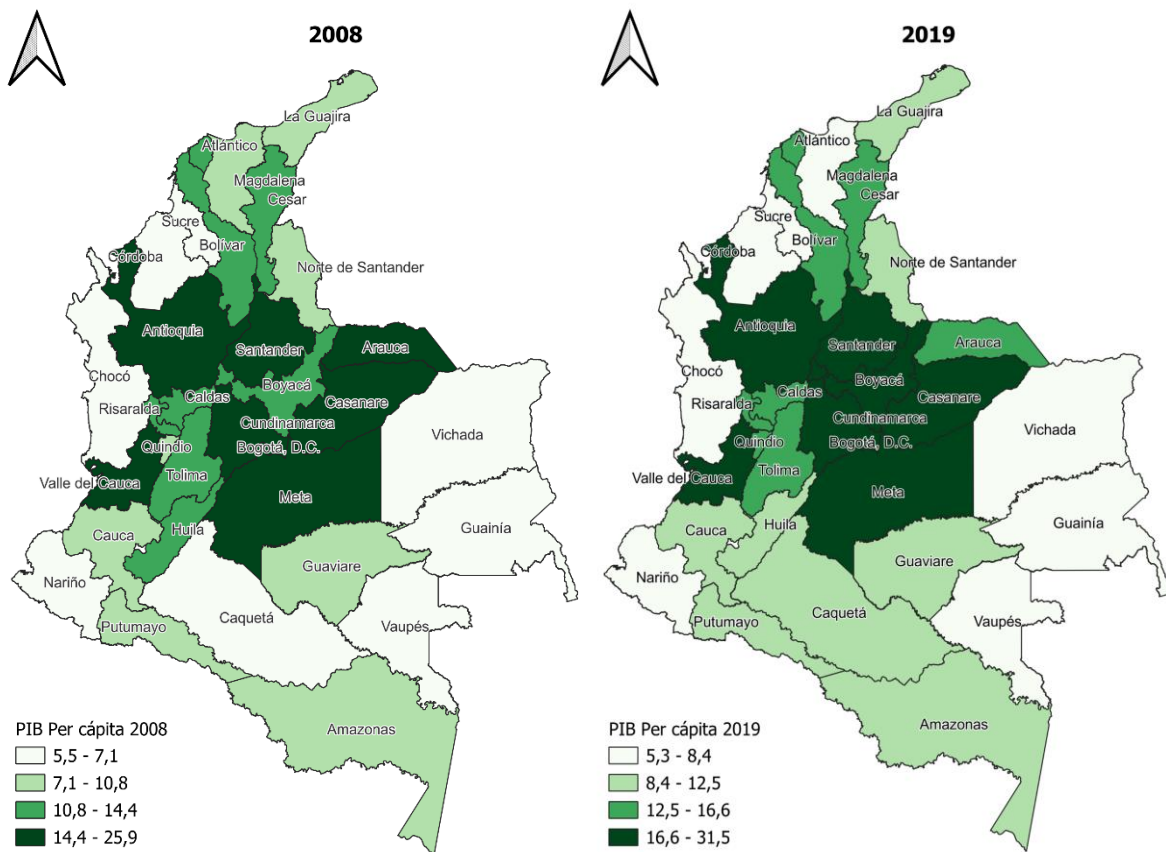
A su vez, el Gráfico 1 muestra la distribución espacial del PIB real per cápita en los años 2008 y 2019. Allí se evidencia la persistente concentración de la producción económica en el centro del país así como en los departamentos de Bolívar, Atlántico y Cesar en el Caribe (norte); Arauca,

² Específicamente, se cuenta con información para Bogotá, la ciudad capital, y 31 departamentos; excluyendo a San Andrés y Providencia del análisis.

Casanare y Meta en el Orinoco (oriente); y el Valle del Cauca, que se extiende desde la Región Andina hasta una parte importante de la Región Pacífico de Colombia.

La presencia de departamentos como Arauca, Casanare, Meta y Cesar en los departamentos que concentran mayor nivel de ingreso, se explica entre otros factores, por la concentración de la producción minera y de petróleo en estos territorios (Acosta & Bonet, 2022); Mientras el caso de departamentos como Bogotá, D. C., Antioquia, Valle del Cauca, Cundinamarca, Atlántico y Santander, se explica por una clara concentración de la actividad industrial en estos departamentos.

**Gráfico 1. Evolución del del producto per cápita a nivel departamental 2008 - 2019
(En millones de pesos del 2015)**



Fuente: Elaboración propia con base en cuentas nacionales departamentales del DANE.

Además, se observa un persistente rezago en los departamentos del noroccidente y suroccidente del país, como Sucre, Córdoba y Chocó, Nariño y Putumayo; así como en la región sur y oriental del país, en los departamentos de Amazonas, Caquetá, Guaviare, Vaupés, Guainía y Vichada.

3.2.2. Cambio climático

Las variables climáticas, fueron construidas tomando como fuente de información al Portal de Conocimiento sobre Cambio Climático del Banco Mundial (CCKP, 2024), más específicamente las series temporales de la Unidad de Investigación Climática (CRU), que registra en cuadrículas de alta resolución (0,5 x 0,5 grados), las variaciones mes a mes del clima durante el período 1901-2020, calculadas a partir de datos diarios o subdiarios reportados por los Servicios Meteorológicos Nacionales y otros agentes externos (Unidad de Investigación Climática de la Universidad de East Anglia, 2021).

Tabla 3. Estadística descriptiva: variables climáticas

Variable	Año	Media	Sd	P25	Median	P75	Min	Max	CV	Theil
Temperatura media (°C)	2007	23,14	3,89	19,98	24,86	26,26	12,95	27,99	0,17	0,01
	2013	23,90	3,82	20,86	25,61	26,94	13,84	28,82	0,16	0,01
	2019	24,11	3,75	21,12	25,90	27,04	14,04	28,79	0,16	0,01
Desviación de la temperatura media con respecto a la media móvil (°C)	2008	-0,21	0,04	-0,23	-0,22	-0,21	-0,25	-0,10	-0,17	0,02
	2013	0,21	0,05	0,17	0,23	0,25	0,09	0,27	0,25	0,03
	2019	0,24	0,04	0,21	0,25	0,28	0,16	0,30	0,18	0,02
Precipitación total (mm/año)	2008	2.733,7	963,4	2.022,7	2.661,2	3.255,1	1.128,9	6.241,2	0,35	0,06
	2013	2.115,4	814,0	1.503,9	2.086,1	2.484,1	858,4	4.761,8	0,38	0,07
	2019	2.079,7	808,2	1.551,5	2.187,2	2.555,1	676,6	4.619,9	0,39	0,07
Precipitación total (media móvil 3 años) (mm/año)	2008	2.554,3	867,0	1.947,7	2.494,4	3.066,7	1.231,4	5.788,4	0,34	0,05
	2013	2.384,7	757,3	1.916,8	2.432,3	2.733,5	1.192,8	5.176,0	0,32	0,05
	2019	2.220,4	808,7	1.598,7	2.250,3	2.732,0	905,3	5.057,3	0,36	0,06

Fuente: Elaboración propia con base en datos del Portal de Conocimiento sobre Cambio Climático - Banco Mundial (CCKP, 2024).

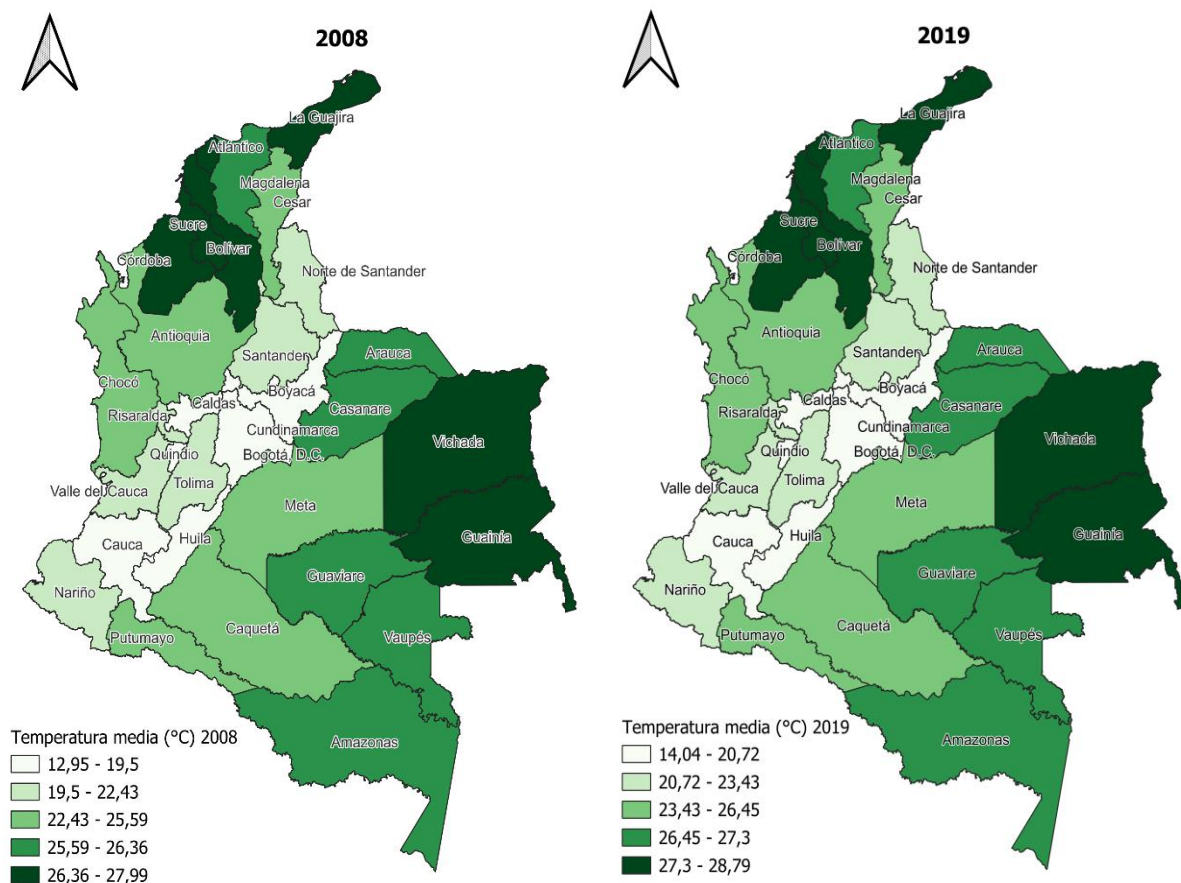
En la literatura, es común usar la temperatura en niveles (Burke, Hsiang y Miguel, 2015; Henseler y Schumacher, 2019) para evaluar su relación con el crecimiento económico. Sin embargo, siguiendo a Baarsch et al. (2020), en este estudio se utilizarán desviaciones respecto a su media histórica para capturar comportamientos anómalos de la temperatura (Abidoye & Odusola, 2015). Nuestra medida es la desviación de la temperatura media (en °C), calculada para periodos móviles de 3 años; especificación que busca aproximar los efectos de las anomalías de temperatura sobre el crecimiento económico a corto plazo (Abidoye & Odusola, 2015). Por otro lado, siguiendo a Barrios, Bertinelli, & Strobl (2010) se introducirá la precipitación anual promediada en periodos móviles de 3 años (en mm), en logaritmo natural.

Además, siguiendo a Burke, Hsiang y Miguel (2015), así como a Henseler y Schumacher (2019), se incluirán funciones cuadráticas de las variables climáticas para evaluar respuestas no lineales del crecimiento ante cambios en las variables. Finalmente, siguiendo a Feng, Yasar y Rejesus (2023),

se validará el efecto de las variables climáticas sobre la convergencia económica mediante la interacción ($\ln Y_{it-1} * C_{it}$) entre la variable de convergencia ($\ln Y_{it-1}$) y la variable climática (C_{it}). Si el parámetro estimado de esta interacción estadísticamente significativo, será un indicio de que las variables climáticas afectan la convergencia económica. Debe anotarse que, si no se estima esta interacción, simplemente se estaría evaluando el efecto de las variables climáticas sobre el crecimiento económico, pero no sobre la convergencia económica.

La Tabla 5 muestra que en el período analizado, la temperatura media osciló en torno a los 23°C y 24°C, con mínimos observados de 12,95 °C y máximos de 28,82°C. La estadística descriptiva muestra que, en promedio, 2019 fue un año más caliente y con menores precipitaciones, que el 2008 y 2013.

Gráfico 2. Temperatura media en los departamentos de Colombia 2008 - 2019 (°C)



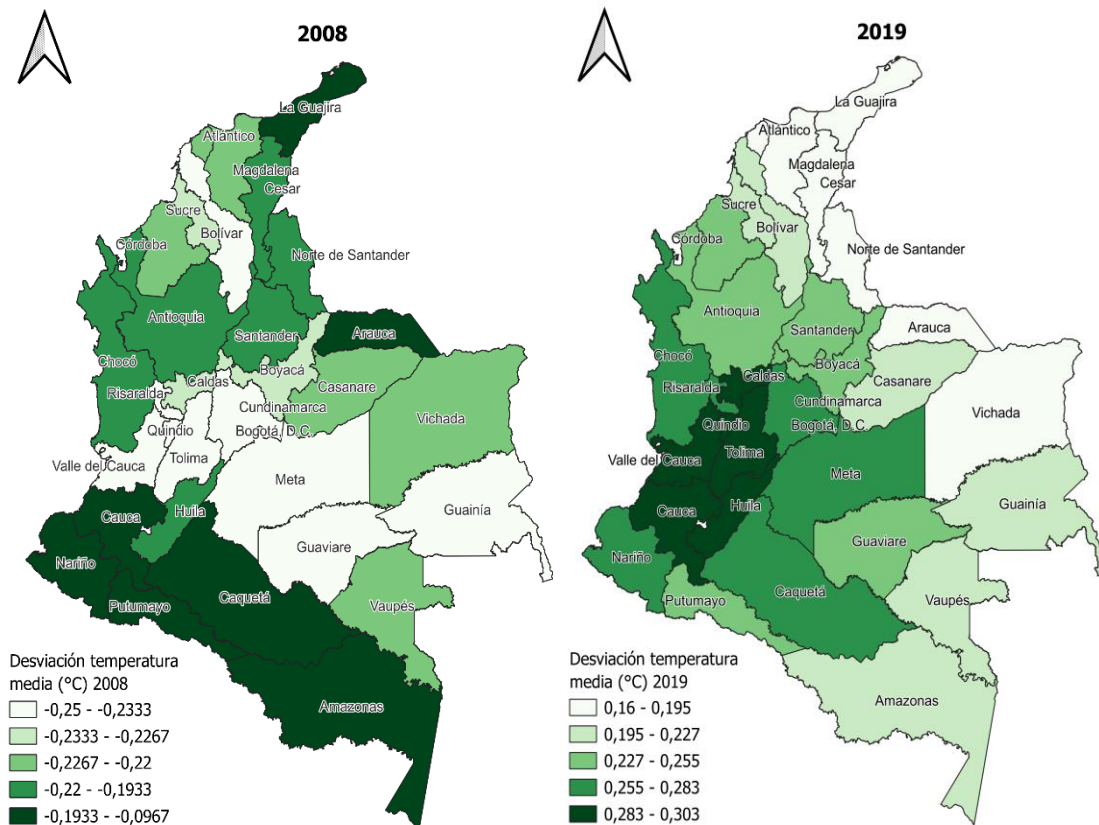
Fuente: Portal de Conocimiento sobre Cambio Climático - Banco Mundial.

El nivel de temperatura por departamentos que se muestra en el Gráfico 2, pone de manifiesto una concentración de los departamentos más fríos en la región Andina (centro del país), conformada por Antioquia, Boyacá, Caldas, Cundinamarca, Huila, Norte de Santander, Quindío, Risaralda,

Santander y Tolima, mientras que los departamentos más cálidos se ubican en el Orinoco Colombiano (Vichada y Guainía) y la región Caribe (La Guajira, Atlántico, Bolívar, Sucre y Córdoba), que corresponde al norte del país.

También se identifica una importante variabilidad en el comportamiento del clima. El 2019 fue en promedio casi 1 °C más caliente que el 2008. Al analizar las anomalías en el comportamiento de la temperatura respecto a las medias móviles de 3 años, se evidencia que, tanto en 2008, como en 2019 es la zona sur y suroccidente del país la que enfrenta las mayores desviaciones en relación a su comportamiento histórico destacando los departamentos de Nariño, Putumayo, Cauca, Huila y Caquetá. Además, se evidencia que el 2019 fue un año en el que departamentos de la Zona Andina, (más fríos) como Caldas, Risaralda, Cundinamarca, Tolima y Quindío, registraron desviaciones de temperatura superiores a las que enfrentaron los departamentos costeros de la zona norte del país.

Gráfico 3. Desviación de la temperatura (con respecto a la media móvil de 3 años) en los departamentos de Colombia 2008 – 2019 (°C)

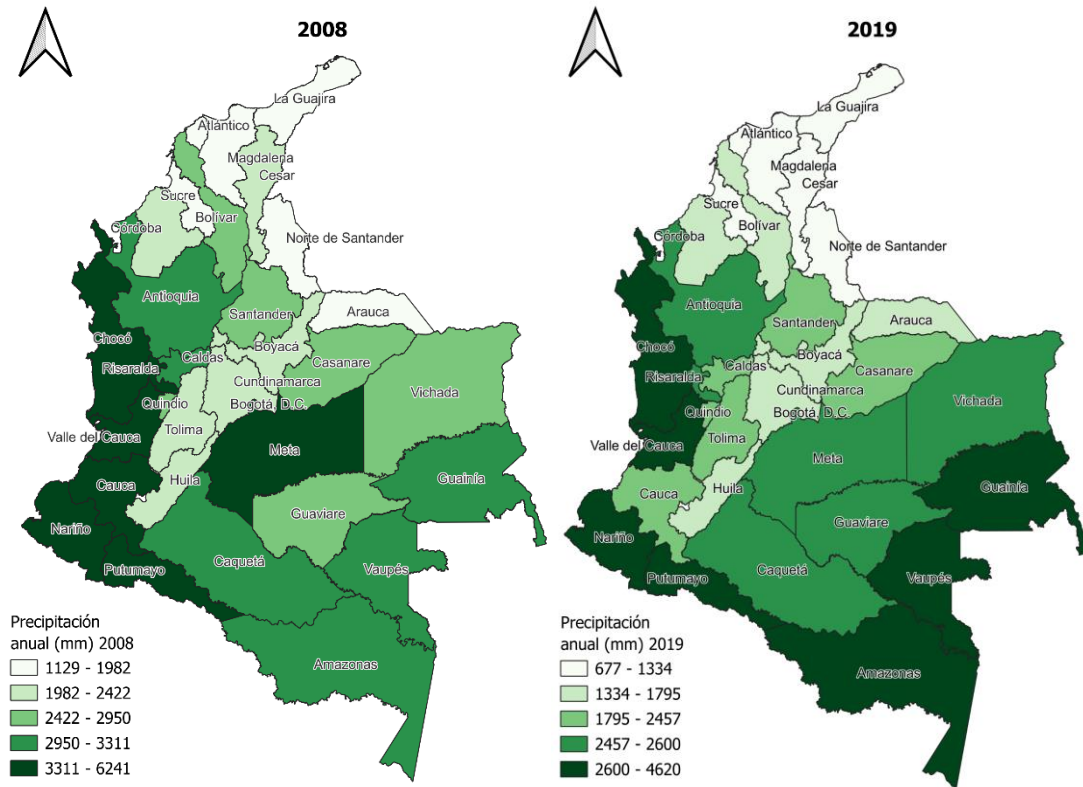


Fuente: Portal de Conocimiento sobre Cambio Climático - Banco Mundial.

Así mismo, los departamentos con mayor pluviosidad se concentran en la Amazonia (sur del país), el Pacífico Colombiano (occidente) y el Orinoco (oriente), siendo el Chocó, de forma consistente, el departamento que registra mayores precipitaciones anuales. A su vez, el 2008 se presenta como

un año con mayor pluviosidad que la registrada en 2013 y 2019, con una media de 2.733,7 mm, contra 2.115,4 mm y 2.079 respectivamente.

Gráfico 4. Precipitación anual en los departamentos de Colombia 2008 – 2019 (mm)



Fuente: Portal de Conocimiento sobre Cambio Climático - Banco Mundial.

En la zona norte del país, los departamentos de la Guajira y el Atlántico se configuran como los departamentos con menores niveles de precipitación (entre 1.129 mm y 1.317 mm entre 2008 y 2017). En la región Andina, los departamentos de Antioquia y Caldas se caracterizan como los más húmedos; mientras Tolima, Huila, Cundinamarca y Boyacá se presentan como departamentos con menos pluviosidad; equiparable con la pluviosidad que registra la zona norte del país, salvo en la Guajira y el Atlántico.

3.2.3. Variables de control

En cuanto a las variables de control, se utiliza como proxy de inversión en capital humano, la relación estudiantes/docente a nivel departamental, medido para los niveles de educación preescolar, básica y media. Este índice refleja el número de estudiantes por docente, donde un valor más bajo indica una mejor relación (Barro, 1991; Egert, et al., 2020). La información proviene de la Encuesta de Educación Formal del DANE.

Tabla 4. Estadística descriptiva: variables de control

Variable	Año	Media	Sd	P25	Median	P75	Min	Max	CV	Theil
Relación estudiantes/docentes	2008	23,67	2,08	22,23	23,27	25,07	20,07	27,92	0,09	0,00
	2013	22,75	1,71	21,70	22,34	23,62	19,97	26,91	0,07	0,00
	2019	22,09	1,95	20,65	22,11	23,79	18,70	26,19	0,09	0,00
Relación gasto/ingreso tributario	2008	6,74	4,07	4,13	6,07	8,76	1,88	21,27	0,60	0,15
	2013	7,38	4,03	4,06	6,44	11,30	2,01	19,07	0,55	0,14
	2019	5,64	2,48	3,54	5,32	7,33	2,05	13,21	0,44	0,09
Tasa de homicidio (#/ cien mil habitantes)	2008	57,66	40,44	29,46	45,36	78,00	17,84	171,74	0,70	0,20
	2013	68,83	42,07	41,49	54,83	83,45	5,66	162,93	0,61	0,17
	2019	25,19	14,09	16,07	20,42	36,06	6,06	57,12	0,56	0,15
Densidad Poblacional (#/km2)	2008	210,75	762,93	9,45	49,43	89,01	0,47	4.336,77	3,62	1,86
	2013	219,55	792,44	10,54	51,55	94,34	0,56	4.503,69	3,61	1,86
	2019	233,92	833,12	11,76	55,29	102,97	0,68	4.730,76	3,56	1,83
Personas con 65 años o más (%)	2008	5,99	1,82	4,75	6,17	7,47	2,67	9,68	0,30	0,05
	2013	6,80	2,12	5,44	6,91	8,44	2,92	10,41	0,31	0,05
	2019	7,97	2,60	5,94	8,01	9,81	3,48	12,95	0,33	0,05

Fuente: Elaboración propia con base en TERRIDATA; Estadísticas Delictivas de la Policía Nacional; Integración de Datos y Estimación Estadística de Víctimas en el marco del conflicto armado y Encuesta de Educación Formal del DANE.

También se incluye la relación gasto total/ingreso tributario, que evalúa la proporción del gasto público en el departamento en comparación con su capacidad de recaudación tributaria. A través de este indicador fiscal se busca aproximar el efecto de la heterogeneidad institucional en los procesos de crecimiento regional (Aristizábal & García, 2020). La fuente de información es TERRIDATA del DNP, en su dimensión Finanzas Públicas.

Asimismo, la tasa de homicidios se utiliza como una medida complementaria de la calidad institucional, dada su relevancia en el contexto del crecimiento económico (Cárdenas, 2007). Se parte de la premisa de que los departamentos con tasas de homicidio elevadas enfrentan retos institucionales más graves (Tebaldi & Alda, 2017). Esta variable se incorpora en quintiles y se construyó a partir de los reportes de las Estadísticas Delictivas de la Policía Nacional y de la Integración de Datos y Estimación Estadística de Víctimas en el marco del conflicto armado, realizada por el DANE y la Comisión de la Verdad.

Asimismo, se incluyen variables demográficas y poblacionales como el índice de densidad poblacional (Au & Henderson, 2006; Ciccone & Hall, 1996) y el índice de envejecimiento (Feyrer, 2007; Bloom et al., 2010), ambos ampliamente utilizadas en la literatura como controles del crecimiento económico. El índice de densidad poblacional se calcula como el número de habitantes dividido por el área total del departamento, y el índice de envejecimiento, representa por el

porcentaje de habitantes mayores de 65 años. Ambos indicadores fueron estimados a partir de las retroproyecciones poblacionales del DANE.

La Tabla 4 presenta las estadísticas descriptivas de las variables utilizadas para el análisis, mostrando un proceso de convergencia en las tasas de homicidio y en la relación gasto/ingreso tributario a nivel departamental. La variable de capital humano revela un comportamiento relativamente homogéneo, con leves mejoras a lo largo del período estudiado. En cuanto a los controles poblacionales, se observa una considerable heterogeneidad en la densidad poblacional a lo largo del tiempo, junto con un crecimiento sostenido del índice de envejecimiento de la población.

3.2.4. Evidencia descriptiva

Antes de analizar la convergencia tipo beta en las siguientes secciones, el Gráfico 5 presenta la evolución de los indicadores de dependencia espacial global, en el tiempo. Esto es, la evolución de la I de Moran y la C de Geary, tanto para el producto per cápita, como para la temperatura media y la precipitación anual. También se presenta la evolución del coeficiente de variación del producto per cápita.

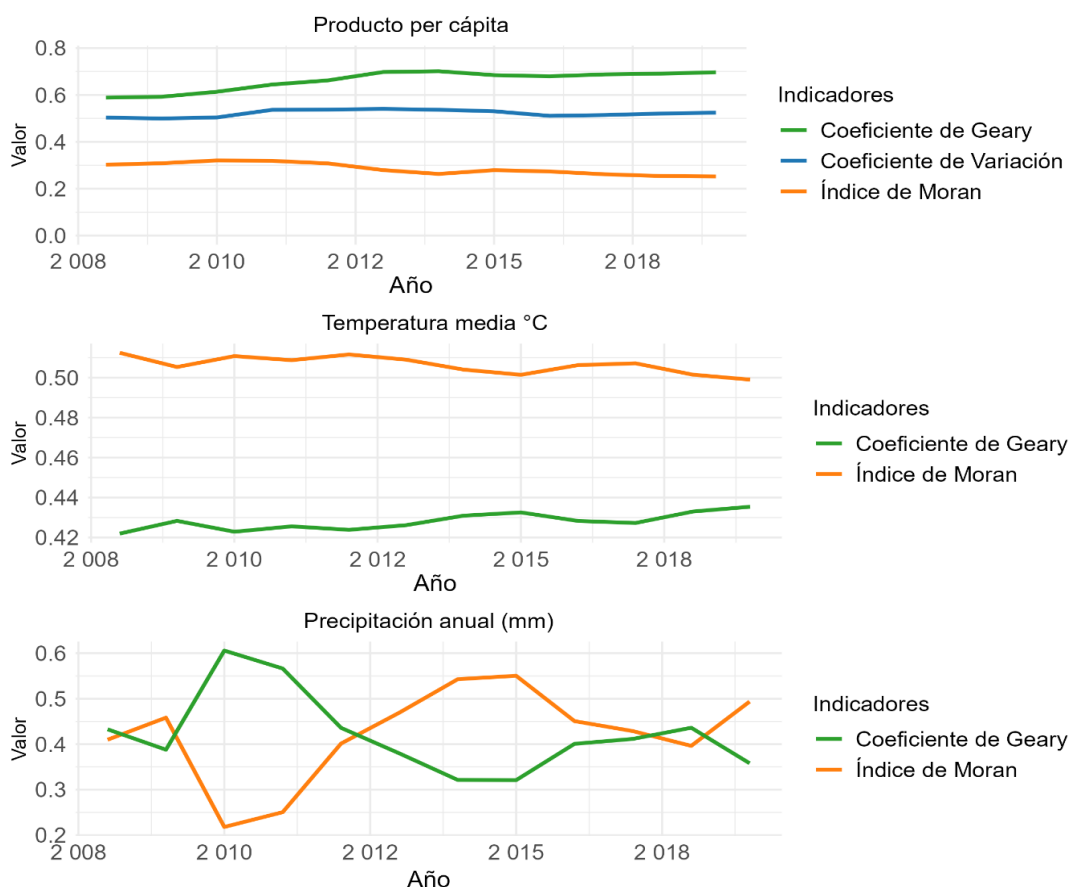
A este respecto, el Índice I de Moran es un indicador global de dependencia espacial que toma valores entre -1 y 1 que permite identificar si los valores de una variable, como el ingreso o la temperatura, tienden a agruparse en áreas cercanas o si están distribuidos de manera dispersa o aleatoria. Este índice considera tanto la ubicación geográfica de las entidades (mediante matrices de vecindad) como sus valores (Anselin, 1995). Un resultado positivo y estadísticamente significativo para el producto per cápita sugiere que los departamentos con alto producto per cápita tienen vecinos con niveles similares de producción, y los departamentos con bajo producto per cápita están rodeados de otros con ingresos similares. En cambio, valores negativos del I de Moran indicarían una relación inversa: los departamentos con alto producto per cápita tendrían como vecinos a departamentos más pobres, y viceversa.

La C de Geary es un indicador que puede tomar valores entre 0 y 2, donde los valores entre 0 y 1 indican autocorrelación positiva; un valor de 1 señala ausencia de autocorrelación, es decir, una distribución aleatoria del producto per cápita; mientras valores entre 1 y 2 indican autocorrelación negativa, lo que sugiere que las entidades cercanas registran niveles de producción opuestos. A diferencia de la I de Morán, la C de Geary se basa en comparaciones locales entre cada entidad y sus vecinos, lo que la hace particularmente sensible a patrones espaciales locales (Siabato & Guzmán, 2019).

Así, el Gráfico 5 sugiere, tal como se anotó previamente que no se puede hablar de convergencia absoluta en el ingreso durante el periodo analizado; ya que la dispersión del producto a nivel

departamental se mantuvo constante, con un coeficiente de variación que ha oscilado entre 0,5 y 0,54. A su vez, el grafico permite identificar la existencia de un fenómeno de dependencia espacial global positiva (desde la óptica de la I de Morán y la C de Geary) que además es estadísticamente significativa, tanto en el comportamiento del producto per cápita, como en el comportamiento de las variables climáticas.

Gráfico 5. Evolución del Coeficiente de Variación, el Índice de Moran y Coeficiente de Geary para el producto per cápita (\$/hab), la temperatura media (°C) y la precipitación total (mm)

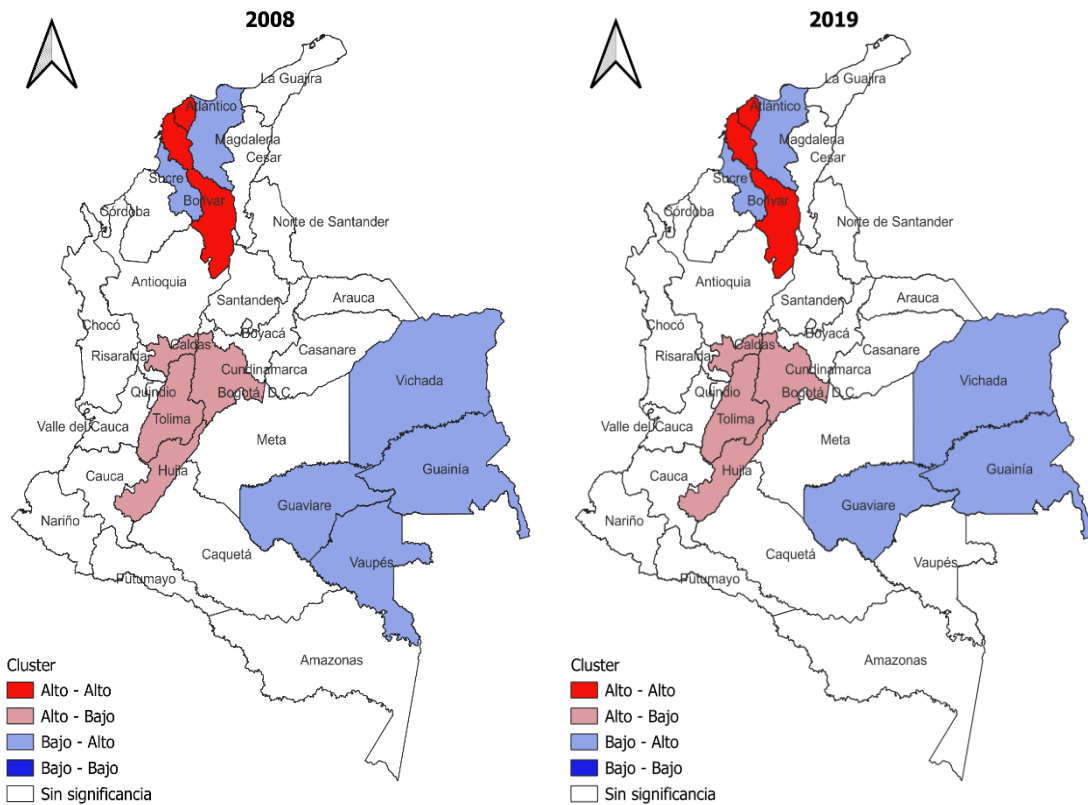


Fuente: Elaboración propia con base en cuentas nacionales departamentales del DANE; Retroproyecciones poblacionales del DANE; Portal de Conocimiento sobre Cambio Climático del Banco Mundial.

Una vez confirmada la existencia de dependencia espacial global en nuestros datos, se procedió a analizar las asociaciones espaciales locales (LISA) entre la temperatura media, la precipitación y el producto per cápita, como se muestra en los Gráficos 6 y 7. En este análisis, la distribución de los valores bivariados del I de Moran proporciona información detallada sobre las relaciones espaciales de las variables analizadas (Castro, et al., 2020). Los resultados indican asociaciones estadísticamente significativas en 13 de los 32 departamentos en relación con la temperatura y la

producción, mientras que 7 de los 32 departamentos presentan asociaciones estadísticamente significativas entre la precipitación anual y el producto per cápita.

Gráfico 6. Mapa de agrupaciones de Moran de las asociaciones espaciales locales entre temperatura media y PIB per cápita a nivel departamental

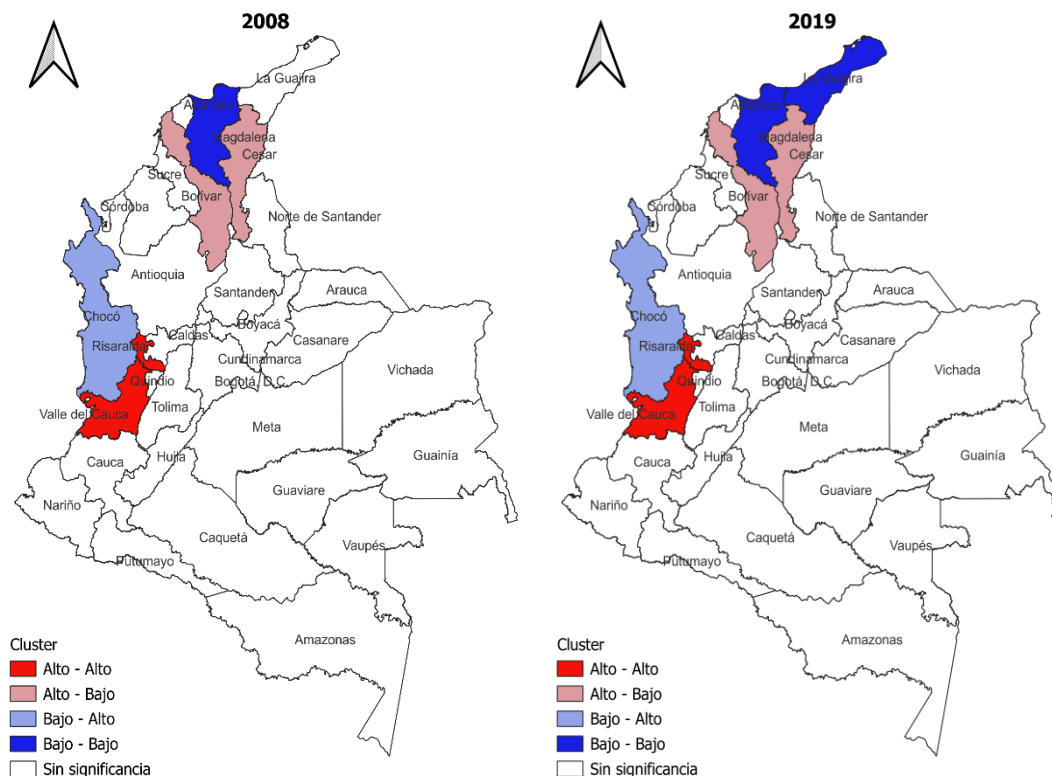


Fuente: Elaboración propia con base en cuentas nacionales departamentales del DANE; Retroproyecciones poblacionales del DANE; Portal de Conocimiento sobre Cambio Climático del Banco Mundial.

En particular, las asociaciones de tipo Alto-Alto indican que ciertos departamentos, que presentan altos niveles de producto per cápita y temperaturas elevadas, están rodeados de áreas con características similares. Este patrón se observa en departamentos como Atlántico y Bolívar, situados en la región Caribe (norte del país), donde la coincidencia de altos niveles de temperatura y producto per cápita es notable.

Por otro lado, las asociaciones Alto-Bajo reflejan departamentos que tienen altos niveles de producto per cápita pero temperaturas bajas, y estos departamentos están rodeados por otros con características similares. Esto es evidente en cuatro departamentos de la región Andina, conocida por concentrar los mayores niveles de producción y las temperaturas medias más bajas: Cundinamarca, Caldas, Tolima y Huila.

Gráfico 7. Mapa de agrupaciones de Moran de las asociaciones espaciales locales entre la precipitación anual y el PIB per cápita a nivel departamental



Fuente: Elaboración propia con base en cuentas nacionales departamentales del DANE; Retroproyecciones poblacionales del DANE; Portal de Conocimiento sobre Cambio Climático del Banco Mundial.

Las asociaciones Bajo-Alto revelan un patrón en el que los departamentos con bajos niveles de producto per cápita presentan temperaturas elevadas y están rodeados de áreas con características similares. Este patrón se observa en departamentos como Magdalena y Sucre en el norte del país, así como en Vichada, Guainía, Guaviare y Vaupés. Finalmente, los departamentos con valores del I de Moran no significativos están representados en blanco en los gráficos, indicando que en estos casos no se detecta una asociación espacial clara o estadísticamente relevante entre las variables analizadas.

En cuanto a la relación entre producto per cápita y precipitación, se identifican varios patrones: una asociación Alto-Alto en los departamentos de Risaralda y Valle, donde altos niveles de producto per cápita coinciden con altas precipitaciones; una asociación Alto-Bajo en Magdalena y Cesar, donde se observan altos niveles de producto per cápita junto a bajas precipitaciones; una asociación Bajo-Alto en el departamento del Chocó, con bajos niveles de producto per cápita y altas precipitaciones; y una asociación Bajo-Bajo en los departamentos del norte del país, como La Guajira y Magdalena, donde bajos niveles de producto per cápita se corresponden con bajas precipitaciones.

4. Metodología

La estimación de la convergencia beta condicionada, que se pretende estimar se presenta de la forma:

$$\ln\left(\frac{Y_{it}}{Y_{it-1}}\right) = \alpha_i + \beta \ln Y_{it-1} + \theta X_{it} + u_{it} \quad (1)$$

Donde, el lado izquierdo de la ecuación aproxima la tasa de crecimiento de un departamento i ; β es el coeficiente de convergencia; α_i es el efecto fijo individual; X_{it} es una matriz de variables explicativas que corresponden a las variables estructurales que condicionan el crecimiento económico de cada departamento, entre las que se encuentran las variables climáticas, y u_{it} es el término de estocástico. Si β resulta ser negativo, significa que regiones más prósperas al comienzo del periodo presentaron tasas de crecimiento más bajas y por lo tanto se afirma que hubo convergencia (Galvis & Hahn, 2015).

En cuanto a la aproximación a partir de técnicas de econometría espacial, debe anotarse que el creciente cuerpo de literatura que emplea estas técnicas para el análisis del crecimiento económico, se justifica, bajo la idea de que no solo las características internas de una región afectan su dinámica de crecimiento, sino también las de las regiones cercanas (Rey y Montouri, 1999; Moncada & Loiza, 2013); relación que es especialmente relevante si se considera que el comportamiento del clima también sigue un patrón espacial.

Para adoptar técnicas de econometría espacial, debe partirse por construir una matriz de contigüidad espacial o una matriz de vecindad de los departamentos, que permita dar cuenta de la influencia de un departamento en el crecimiento de su vecino. La interacción de esta matriz con el residuo, con las explicativas, y con la dependiente, da lugar a lo que se le considera el rezago espacial (Aristizábal y García, 2020). Aunque existen diferentes tipos de matrices espaciales, como las basadas en distancia o K-vecinos, es común en el estudio del crecimiento económico la adopción de matrices de contigüidad tipo Queen estandarizada de primer orden (Gómez & Santana, 2016).

En el marco de este estudio, se explorarán cuatro tipos de modelos que abordan distintas formas de dependencia espacial. Según Elhorst (2014), el modelo espacial autorregresivo (SAR) incorpora una variable dependiente con rezago espacial en las variables explicativas. Por otro lado, el modelo de error espacial (SEM) considera la dependencia espacial al descomponer el término de error en un componente idiosincrático y otro rezagado espacialmente. El modelo espacial autorregresivo con error espacial (SAC) aborda la dependencia espacial tanto en el término de error como al incluir una variable dependiente con rezago espacial en las variables explicativas, mientras que el modelo espacial de Durbin (SDM) incorpora la dependencia espacial tanto en las variables dependientes como en las explicativas (LeSage y Pace, 2009).

La inclusión de términos de rezago espacial en las variables dependientes o explicativas ayuda a determinar la existencia de efectos indirectos y totales, así como su significancia estadística (LeSage y Pace, 2009). Esto se debe a que, al cambiar una variable explicativa para un departamento, se producen cambios no solo en la variable dependiente de ese departamento (efecto directo), sino de también en la de otros departamentos (efecto indirecto). Estos efectos indirectos representan los efectos de desbordamiento espacial. La formulación matemática de los modelos mencionados se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5. Modelos de datos de panel espacial

Modelo autorregresivo espacial (SAR)	$\ln\left(\frac{Y_{it}}{Y_{it-1}}\right) = \alpha_i + \beta \ln(Y_{it-1}) + \rho W \ln\left(\frac{Y_{it}}{Y_{it-1}}\right) + \theta X_{it} + \varepsilon_{it}$
Modelo de error espacial (SEM)	$\ln\left(\frac{Y_{it}}{Y_{it-1}}\right) = \alpha_i + \beta \ln(Y_{it-1}) + \theta X_{it} + \varepsilon_{it}$ $\varepsilon_{it} = \lambda W \varepsilon_{it} + u_{it}$
Modelo SAC	$\ln\left(\frac{Y_{it}}{Y_{it-1}}\right) = \alpha_i + \beta \ln(Y_{it-1}) + \rho W \ln\left(\frac{Y_{it}}{Y_{it-1}}\right) + \theta X_{it} + \varepsilon_{it}$ $\varepsilon_{it} = \lambda W \varepsilon_{it} + u_{it}$
Modelo espacial de Durbin (SDM)	$\ln\left(\frac{Y_{it}}{Y_{it-1}}\right) = \alpha_i + \beta \ln(Y_{it-1}) + \rho W \ln\left(\frac{Y_{it}}{Y_{it-1}}\right) + \theta X_{it} + \gamma W X_{it} + \varepsilon_{it}$

Fuente: Aristizábal & García, (2020).

5. Resultados y discusión

5.1. Estimaciones

En la Tabla 6 se presentan los resultados de la estimación de los modelos de crecimiento a partir datos de panel espacial con efectos fijos, aumentados por las variables climáticas. Específicamente, en la primera columna se presentan los resultados de la estimación a partir de un modelo de datos panel con efectos fijos; mientras las siguientes 4 columnas corresponden a las especificaciones que consideran la dependencia espacial a partir de un rezago espacial de la variable dependiente (SAR), en los residuos (SEM), en los residuos y la dependiente rezagada (SAC); y en la dependiente y las explicativas (SDM).

Es importante señalar que solo se reportan los resultados para los modelos de efectos fijos, ya que, tras correr los modelos Pooled, de efectos fijos y de efectos aleatorios, y realizar los respectivos test F restringido y test de Hausman, se concluyó que el modelo de efectos fijos es preferible tanto al modelo Pooled como al de efectos aleatorios. Asimismo, se realizaron test de Hausman espaciales para comparar los modelos espaciales de efectos fijos y aleatorios, y en todos los casos se prefirió el modelo de efectos fijos. Los resultados detallados de estos test, así como las salidas de las regresiones Pooled y de efectos fijos, se presentan en el anexo.

Dado que las pruebas LM robustas permiten identificar el tipo de dependencia espacial que debería considerarse en la estimación (Anselin et al., 1996; Elhorst, 2014), en la parte inferior de la tabla se presentan las pruebas LM simples y robustas de dependencia espacial al modelo de efectos fijos.

Los resultados de estas pruebas indican que no se puede rechazar la hipótesis nula de ausencia de dependencia espacial en la variable dependiente ni en el término de error. A su vez, la prueba LM robusta para el término de rezago es significativa al 10%, mientras que la correspondiente al término de error lo es al 5%, lo que sugiere una preferencia por el modelo SEM sobre el SAR.

**Tabla 6. Estimaciones de modelos de crecimiento a partir de datos de panel espacial
Y = Tasa de crecimiento del PIB per cápita**

Variable	Sin efectos espaciales		Con efectos espaciales		
	FE	SAR	SEM	SAC	SDM
Ln PIB per cápita (t-1)	-0.196*** (0.038)	-0.197*** (0.038)	-0.203*** (0.038)	-0.200*** (0.038)	-0.205*** (0.038)
Temperatura	0.094** (0.039)	0.094** (0.039)	0.090* (0.039)	0.079** (0.039)	0.102*** (0.039)
Temperatura2	-0.149*** (0.028)	-0.144*** (0.028)	-0.139*** (0.028)	-0.120*** (0.028)	-0.096*** (0.028)
Ln PIB per cápita (t-1)*Temperatura	-0.033* (0.014)	-0.033** (0.014)	-0.030** (0.014)	-0.023 (0.014)	-0.044*** (0.014)
Ln Precipitación	-0.551 (0.389)	-0.565 (0.389)	-0.661* (0.389)	-0.745* (0.389)	-0.607 (0.389)
Ln Precipitación2	0.039 (0.026)	0.039 (0.026)	0.047* (0.026)	0.055** (0.026)	0.045* (0.026)
(w)Ln PIB per cápita (t-1)					0.063 (0.048)
(w) Temperatura					0.132 (0.099)
(w) Temperatura2					-0.108 (0.072)
(w) Ln PIB per cápita (t-1)* Temperatura					-0.051 (0.037)
(w) Ln Precipitación					-0.00003*** (0.00001)
(w) Ln Precipitación2					
λ		0.046 (0.067)		-0.426*** (0.135)	0.062 (0.071)
ρ			0.143** (0.070)	0.521*** (0.097)	
Velocidad de convergencia (%)	9,58%	9,61%	9,78%	9,69%	9,83%
Vida media (años)	7,24	7,22	7,09	7,15	7,05
Prueba LM de dependencia espacial					
Retraso de LM	0.424				
LM Error	1.875				
Robusto retraso de LM	2.953*				
Error LM robusto	4.404**				
N	384	384	384	384	384

Notas: Errores estándar entre paréntesis. Velocidad de convergencia $\ln(1 - T\beta)/T =$, Vida media = $\ln(2)/\text{Velocidad de convergencia}$ ***p<0.01, **p<0.05, *p<0.1. Para todas las especificaciones se estiman errores estándar robustos utilizando el método de Arellano (1987), dado que al realizar el test de Breusch-Godfrey/Wooldridge para autocorrelación general, se rechaza la hipótesis nula de ausencia de correlación serial en los residuos.

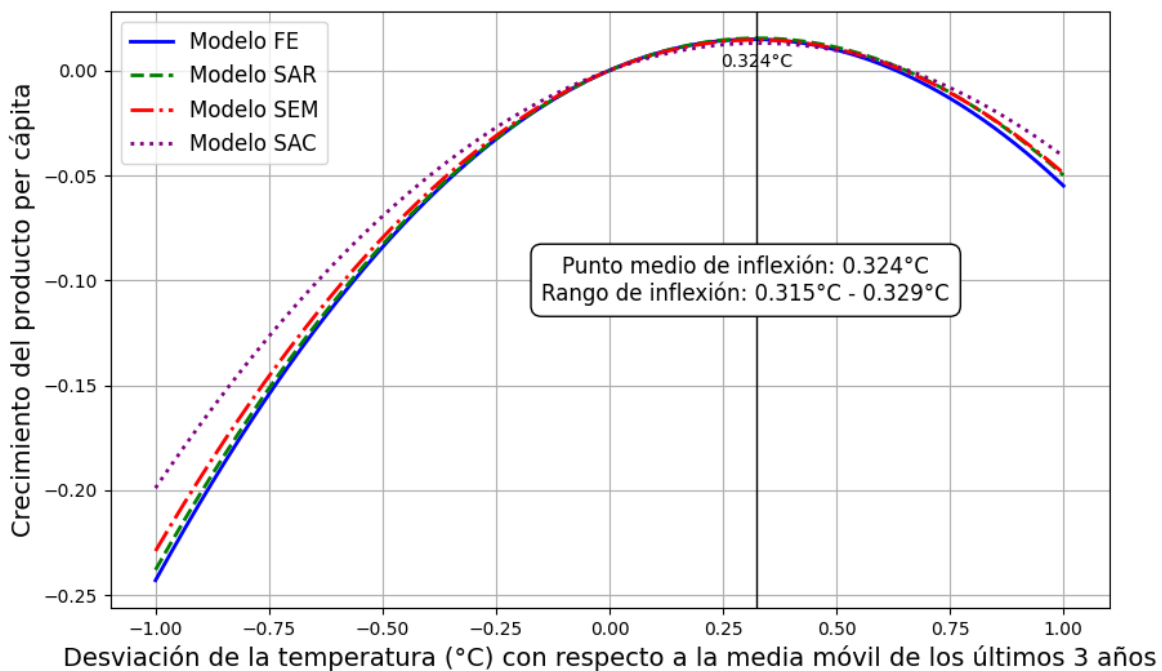
En términos generales, el coeficiente del PIB real per cápita en t-1 es negativo y estadísticamente significativo, lo que sugiere la existencia de procesos de convergencia regional condicional en Colombia entre 2008 y 2019; resultado que se mantiene consistente cuando se incorporan estructuras de dependencia espacial. Esto implica que, una vez condicionado el modelo a las

características estructurales de cada región, las regiones más pobres tienden a acercarse más rápidamente a su crecimiento de estado estacionario.

En cuanto al ritmo de convergencia, los resultados indican que, al considerar las diferencias en los estados estacionarios entre regiones, los coeficientes oscilan entre -0.196 y -0.205, lo que sugiere una tasa de convergencia entre el 9% y el 10%. Estos hallazgos son consistentes con los reportados por Aristizábal y García (2020), quienes estimaron una velocidad de convergencia entre el 9.2% y el 9.8% para el período 2006-2016 en 24 departamentos de Colombia. No obstante, estos resultados son superiores a los documentados por Royuela y García (2015) para el período 1971-2015, por Galvis, Galvis y Hahn (2017) para el período 1995-2016, y por Gómez (2006) para el período 1960-2000.

A pesar de nuestros resultados, debe resaltarse que la existencia de procesos de convergencia beta condicionada solo indica que los departamentos con características similares están logrando converger; lo que no implica necesariamente que el producto departamental esté convergiendo o que se presente una convergencia tipo sigma (Meisel, 1993). Esto se debe a que, como hemos documentado, la dispersión del producto departamental entre 2008 y 2019 se ha mantenido constante (ver Tabla 1 y Gráfico 5).

Gráfico 8. Relación entre la desviación de la temperatura media y el crecimiento económico



Notas: El punto de inflexión se calcula como $-\hat{\beta}_{Temperature}/2\hat{\beta}_{Temperature}^2$ que resulta de derivar la ecuación de crecimiento económico con respecto a la desviación de la temperatura y estimar el nivel de desviación que iguala el crecimiento económico a cero.

Por otro lado, al aumentar el modelo de crecimiento por las variables de cambio climático, se observa que los coeficientes asociados a la desviación de la temperatura media y su función cuadrática son estadísticamente significativos, lo que sugiere que el cambio climático, manifestado a través de cambios en la temperatura, se asoció con el crecimiento económico en los departamentos de Colombia durante el período analizado.

Si bien los resultados sugieren la existencia de una relación no lineal entre esta la desviación de la temperatura media y el crecimiento económico; debe anotarse que estos resultados, difieren de los registrados en la literatura (Burke, Hsiang, & Miguel, 2015; Henseler y Schumacher, 2019), que han reportado una función cuadrática en forma de U invertida, con un nivel de temperatura óptimo que, según los estudios, oscila entre los 6 °C (Du et al., 2017), los 10°C (Henseler y Schumacher, 2019) y los 13 °C (Burke et al., 2015), y que predicen que a partir de cierta temperatura, los efectos sobre el crecimiento económico comienzan a ser negativos.

Nuestros resultados, en contraste, sugieren que existe un nivel óptimo de desviación de la temperatura media, y que desviaciones superiores a este nivel desencadenan efectos negativos sobre el crecimiento. Utilizando las estimaciones de los parámetros de la ecuación (filas 2 y 3 de la Tabla 6), es posible graficar el efecto de la temperatura sobre el crecimiento económico. En el Gráfico 8 se muestran los resultados, observándose un efecto positivo de la temperatura sobre el crecimiento económico, pero a partir de los 0.32°C se observa un efecto negativo sobre el crecimiento económico regional.

Sorprendentemente, este resultado se acerca al reportado por Baarsch et al. (2020) para África subsahariana, donde se estimó que la desviación media óptima es de aproximadamente 0.3° por encima de la media histórica. Sin embargo, debe destacarse que la diferencia entre los resultados radica en que los estimados en este estudio son efectos de corto plazo (desviaciones con respecto a la temperatura de un periodo móvil de 3 años), mientras que las estimaciones de Baarsch et al. (2020) estiman efectos de largo plazo (desviaciones respecto a la temperatura media de 1951-1980).

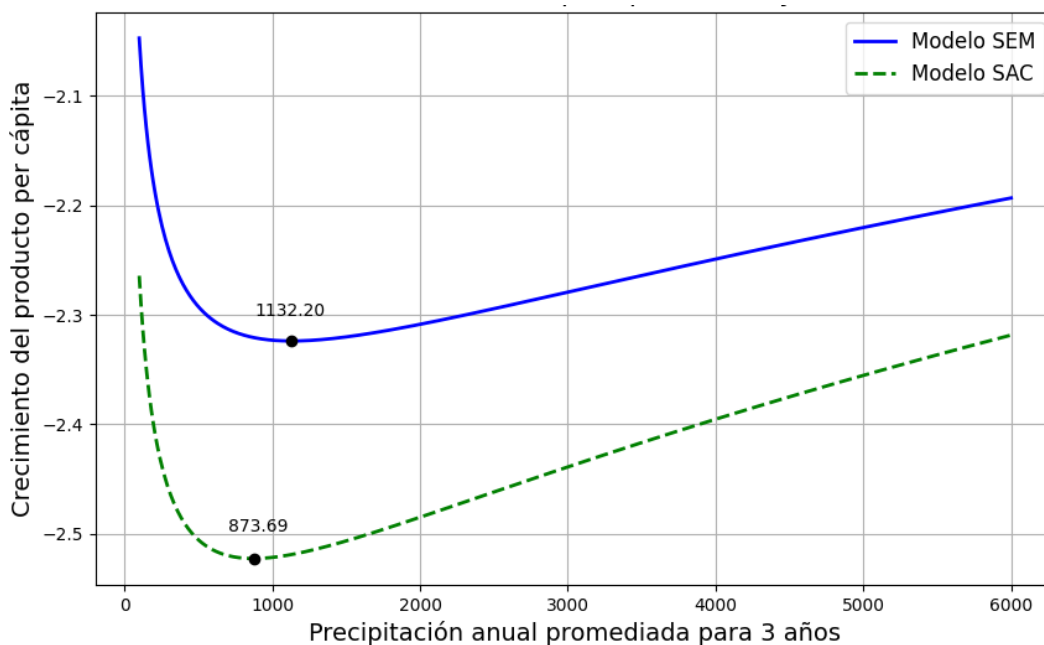
Los resultados también sugieren que, al considerar la interacción entre la desviación de la temperatura y la variable de convergencia, en el período evaluado, las desviaciones de la temperatura han reforzado los procesos de convergencia regional condicionada, resultado que se mantiene bajo las distintas especificaciones de dependencia espacial; lo que sugiere que los cambios en la temperatura afectaron de forma más severa a los departamentos más ricos.

Este resultado es similar al observado por Berg et al. (2023) en su análisis a nivel de países, quien concluye que las respuestas positivas del crecimiento del PIB per cápita ante variaciones en la temperatura global son más probables en países más pobres, lo que sugiere un efecto pro-

convergencia del crecimiento en la temperatura; aunque contrasta con los hallazgos de Dell et al. (2012), Khan & Rashid (2022) y Baarsch et al. (2020).

En relación con la relación entre las precipitaciones y el crecimiento económico, es importante destacar que lo estimado es la elasticidad del crecimiento frente a los niveles de precipitación. Aunque la Tabla 6 indica que esta relación es estadísticamente significativa solo cuando se considera la dependencia bajo estructuras SEM y SAC, los resultados sugieren la existencia de no linealidades en la relación entre el crecimiento económico y el comportamiento de las precipitaciones.

Gráfico 9. Relación entre las precipitaciones y el crecimiento económico



Notas: El punto de inflexión se calcula como $-\hat{\beta}_{Temperature}/2\hat{\beta}_{Temperature^2}$ que resulta de derivar la ecuación de crecimiento económico con respecto a la desviación de la temperatura y estimar el nivel de desviación que iguala el crecimiento económico a cero.

En particular, se observa una relación negativa entre el crecimiento económico y las precipitaciones, y una positiva en su especificación cuadrática, lo que indica que bajos niveles de precipitación (sequías) afectan negativamente al crecimiento, efecto que se atenúa a medida que aumentan las lluvias. Nuestras estimaciones muestran que, cuando la precipitación anual (promediada en 3 años) supera los 873 mm en el modelo SAC o los 1.132 mm en el modelo SEM, el impacto de la variación de las precipitaciones sobre el crecimiento empieza a ser positivo. A este respecto debe anotarse que aunque la literatura ya ha identificado no linealidades en la relación entre precipitaciones y crecimiento, los resultados de Damania et al. (2020) señalan una relación cóncava, como la

documentada en este estudio para la temperatura, en lugar de la convexa estimada para la relación entre crecimiento y precipitaciones.

5.2. Efectos directos e indirectos

Si bien los test LM robustos sugieren una preferencia por el modelo SEM sobre el SAR; para calcular los efectos indirectos y diferenciar entre efectos directos e indirectos, el análisis de basa en el modelo SAR, SAC y SDM.

Tabla 7. Efectos indirectos directos e indirectos de las regresiones SAR, SAC y SDM

	SAR			SAC			SDM		
	ED	EI	ET	ED	EI	ET	ED	EI	ET
Ln PIB per cápita (t-1)	-0.197*** (0.023)	-0.009 (0.016)	-0.206*** (0.029)	-0.208*** (0.022)	0.067*** (0.019)	-0.140*** (0.022)	-0.205*** (0.021)	-0.014 (0.018)	-0.219*** (0.027)
Temperatura	0.094** (0.041)	0.004 (0.008)	0.098** (0.044)	0.082** (0.038)	-0.026* (0.014)	0.055** (0.026)	0.102* (0.054)	0.007 (0.010)	0.109* (0.058)
Temperatura2	-0.144*** (0.039)	-0.007 (0.012)	-0.151*** (0.042)	-0.125** (0.060)	0.040* (0.021)	-0.084** (0.043)	-0.096 (0.062)	-0.006 (0.011)	-0.103 (0.070)
Ln PIB per cápita (t-1)* Temperatura	-0.033** (0.016)	-0.001 (0.003)	-0.034** (0.017)	-0.023 (0.014)	0.008 (0.005)	-0.016 (0.010)	-0.044** (0.018)	0.003 (0.004)	-0.047** (0.020)
Ln Precipitación	-0.565** (0.270)	-0.027 (0.048)	-0.593* (0.287)	-0.772*** (0.285)	0.250** (0.111)	-0.522** (0.202)	-0.608** (0.277)	-0.040 (0.065)	-0.648** (0.306)
Ln Precipitación2	0.040** (0.018)	0.002 (0.003)	0.042** (0.019)	0.057*** (0.019)	-0.018** (0.008)	0.038*** (0.014)	0.045** (0.019)	0.003 (0.005)	0.048** (0.021)

Nota: ED: Efectos directos; EI: Efectos indirectos; ET: Efectos totales. Errores estándar entre paréntesis. ***p<0.01, **p<0.05, *p<0.1

Al analizar los efectos directos e indirectos de las desviaciones de temperatura sobre el crecimiento económico, los resultados del modelo SAC revelan que el efecto indirecto (spillover) es negativo en su nivel, pero positivo en la especificación cuadrática. Esto implica que las desviaciones de temperatura en un departamento reducen el crecimiento económico en los departamentos vecinos, aunque pasado un punto de inflexión, las desviaciones más pronunciadas podrían favorecer ajustes que promuevan el crecimiento en las áreas adyacentes.

Por otro lado, el efecto indirecto de las precipitaciones sobre el crecimiento en el modelo SAC muestra que incrementos iniciales en las precipitaciones de un determinado departamento, son beneficiosos para el crecimiento de los departamentos vecinos, aunque también se identifica un punto de inflexión.

Si bien estas relaciones no se replican completamente en los modelos SAR y SDM, los resultados sugieren que las variaciones en temperatura y precipitaciones pueden desencadenar una recomposición sectorial y espacial de las actividades económicas en Colombia, alterando tanto la tasa de crecimiento local como la de las regiones vecinas.

6. Conclusiones

Este estudio examina la convergencia regional en Colombia a través de un análisis de panel espacial que comprende un periodo de 11 años (2008-2019) para 32 departamentos. Se utilizaron modelos de crecimiento económico aumentados por variables climáticas y diferentes formas de dependencia espacial, con el fin de evaluar los efectos indirectos sobre el crecimiento y la convergencia intrarregional.

Uno de los hallazgos que más llama la atención es el efecto pro-convergencia de las desviaciones de la temperatura media. Esto indica que, durante el período estudiado, los departamentos más desarrollados –con mayores niveles de PIB per cápita– fueron particularmente vulnerables a las variaciones de temperatura, en contraste con los departamentos menos desarrollados; vulnerabilidad que puede estar sugiriendo una falta de inversión en medidas de mitigación y adaptación al cambio climático en las zonas más prósperas. El fuerte racionamiento de agua llevado a cabo en Bogotá durante el 2024 a causa del fenómeno de El Niño, que afectó de manera crítica las principales fuentes de abastecimiento de agua de la ciudad (los embalses Chuza y San Rafael), destaca cómo los fenómenos climáticos pueden impactar severamente a las regiones del centro económico del país.

Este resultado contrasta con estudios previos a nivel de países, subrayando la importancia de generar más evidencia específica para países en desarrollo y de realizar análisis subnacionales. Comprender los mecanismos que explican la relación entre crecimiento y cambio climático a nivel micro es esencial, ya que las evaluaciones a nivel macro suelen enmascarar o suavizar los efectos que pueden identificarse a escalas más detalladas (Burke, Hsiang y Miguel, 2015).

Por otro lado, la relación no lineal observada entre las desviaciones de temperatura y el crecimiento económico refleja la complejidad de esta interacción. Estos hallazgos podrían orientar la formulación de políticas de cambio climático mediante la implementación de medidas de mitigación y adaptación que consideren los umbrales críticos identificados en este análisis (0.32°C).

Además, los efectos espaciales indirectos observados, especialmente la influencia negativa que un cambio de temperatura en un departamento puede ejercer sobre el crecimiento económico de sus vecinos, sugieren que las políticas económicas deben tener en cuenta no solo los efectos locales, sino también las interdependencias regionales. Incorporar estos efectos derrame en la planificación económica podría favorecer una adaptación más equitativa y efectiva a nivel departamental.

7. Bibliografía

- Abidoye, B., & Odusola, A. (2015). Climate Change and Economic Growth in Africa: An Econometric Analysis. *Journal of African Economies*, 24(2), 277 - 301. doi:<https://doi.org/10.1093/jae/eju033>
- Abreu, M., De Groot, H., & Florax, R. (2005). A meta-analysis of β -convergence: The legendary 2%. *Journal of economic surveys*, 19(3), 389 - 420.
- Abreu, M., De Groot, H., & Florax, R. (2005). Space and growth: A survey of empirical evidence and methods. *Region et Development*, 21, 12 – 43.
- Acosta, K., & Bonet, J. (2022). Convergencia regional en Colombia en el Siglo XXI. *Documento sobre economía regional y urbana*(308).
- Arellano, M. (1987). Computing Robust Standard Errors for Within-groups Estimators. *Oxford bulletin of Economics and Statistics*, 49(4), 431–434.
- Aristizábal, J., & García, G. (2020). Regional economic growth and convergence: The role of institutions and spillover effects in Colombia. *Regional Science Policy & Practice*, 13(4), 1146 - 1161.
- Au, C., & Henderson, J. (2006). Are Chinese Cities Too Small? *Review of Economic Studies*, 73(3), 549-576.
- Auffhammer, M., & Mansur, E. (2014). Measuring climatic impacts on energy consumption: A review of the empirical literature. *Energy Economics*, 46, 522 - 530.
- Auffhammer, M., Hsiang, S., Schlenker, W., & Sobel, A. (2013). Using Weather Data and Climate Model Output in Economic Analyses of Climate Change. *Review of Environmental Economics and Policy*, 7(2), 181 – 198. doi:[10.1093/reep/ret016](https://doi.org/10.1093/reep/ret016)
- Ayinde, O., Muchie, M., & Olatunji, G. (2011). Effect of Climate Change on Agricultural Productivity in Nigeria: A Cointegration Model Approach. *Journal of Human Ecology*, 35(3), 189 - 194.
- Baarsch, F., Granadillos, J., Hare, W., Knaus, M., Krapp, M., Schaeffer, M., & Lotze, H. (2020). The impact of climate change on income and convergence in Africa. *World Development*, 126.
- Baena, D., Fuentes, J., Pino, L., Marín, S., Horta, S., & Fonseca, W. (2020). Contexto Regional Andina. *Observatorio Regional ODS*.
- Bakkensen, L., & Barrage, L. (2017). Flood risk belief heterogeneity and coastal home price dynamics: Going under water? *National Bureau of Economic Research*.(No. w23854). doi:[doi:10.3386/w23854](https://doi.org/10.3386/w23854)

- Baldauf, M., Garlappi, L., & Yannelis, C. (2020). Does Climate Change Affect Real Estate Prices? Only If You Believe In It. *The Review of Financial Studies*, 33(3), 1256 – 1295. doi:doi:10.1093/rfs/hhz073
- Barrios, S., Bertinelli, L., & Strobl, E. (2010). Trends in Rainfall and Economic Growth in Africa: A Neglected Cause of the African Growth Tragedy. *Review of Economics and Statistics*, 92(2), 350–366. doi:10.1162/rest.2010.11212
- Barrios, S., Ouattara, O., & Strobl, E. (2008). Impact of Climatic Change on Agricultural Production: Is It different for Africa?. *Food Policy*, 33(4).
- Barro, R. (1991). Economic growth in a cross section of countries. *The Quarterly Journal of Economics*, 106(2), 407 - 44.
- Barro, R., & Sala-i-Martin, X. (1991). Convergence across states and regions. *Brookings Papers on Economic Activity*, 22(1), 107 - 182.
- Berg, K., Curtis, C., & Mark, N. (2023). Gdp and temperature: Evidence on cross-country response heterogeneity. *National Bureau of Economic Research, working paper 31327*.
- Birchenall, J., & Murcia, G. (1997). Convergencia regional: una revisión del caso colombiano. . *Archivos de Macroeconomía. Departamento Nacional de Planeación*, 2 - 32.
- Bloom, D., Canning, D., & Fink, G. (2010). Implications of Population Aging for Economic Growth. *Oxford Review of Economic Policy*, 26(4), 583-612.
- Boko, M., Niang, I., Nyong, A., Vogel, C., Githeko, A., Medany, M., . . . Yanda, P. (2007). Africa. En M. Parry, O. Canziani, J. Palutikof, P. Van der Linden, & C. Hanson, *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (págs. 433 - 467). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Bonet, J., & Meisel, A. (1999). La convergencia regional en Colombia: una visión de largo plazo. *Documentos de Trabajo sobre Economía Regional*(8), 2 - 49.
- Bonet, J., & Meisel, A. (2006). Polarización del ingreso per cápita departamental en Colombia, 1975-2000. *Documentos de trabajo sobre economía regional*, 76.
- Brunner, A. (2002). El Nino and world primary commodity prices: warm water or hot air? *Review of Economics and statistics*, 84(1), 176 - 183.
- Burke, M., Hsiang, S., & Miguel, E. (2015). Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature*, 527(7577), 235 - 239.
- Cardenas, M. (2007). Economic growth in Colombia: a reversal of fortune? *Ensayos Sobre Política Económica*, 25(53), 220-259.
- Cárdenas, M., & Pontón, A. (1995). Growth and convergence in Colombia: 1950-1990. *Journal of Development Economics*, 47(1), 5 - 37.
- Cashin, P., Mohaddes, K., & Raissi, M. (2017). Fair weather or foul? The macroeconomic effects of El Niño. *Journal of International Economics*, 106, 37 - 54.

- Castro, A., Charry, A., Castro, F., Sylvester, J., & Bax, V. (2020). Reducing deforestation through value chain interventions in countries emerging from conflict: The case of the Colombian cocoa sector. *Applied Geography*, 123.
- CCKP. (2024). *Climate Change Knowledge Portal - World Bank*. Obtenido de <https://climateknowledgeportal.worldbank.org>
- Ceylan, R., & Abiyev, V. (2016). An examination of convergence hypothesis for EU-15 countries. *International Review of Economics & Finance*, 45, 96 - 105.
- Cicchone, A., & Hall, R. (1996). Productivity and the Density of Economic Activity. *American Economic Review*, 86(1), 54-70.
- Colacito, R., Hoffmann, B., & Phan, T. (2019). Temperature and growth: A panel analysis of the United States. *Journal of Money, Credit and Banking*, 51(2-3), 313 - 368.
- Cresso, M., Clerici, N., & Sanchez, A. &. (2020). Future Climate Change Renders Unsuitable Conditions for Paramo Ecosystems in Colombia. *Sustainability*, 12(20), 8373. doi:10.3390/su12208373
- Damania, R., Desbureaux, S., & Zaveri, E. (2020). Does rainfall matter for economic growth? Evidence from global sub-national data (1990–2014). *Journal of Environmental Economics and Management*, 102.
- DANE. (2012). *Atlas estadístico Colombia*. Departamento Administrativo Nacional de Estadística.
- DANE. (2015). *Censo Nacional Agropecuario 2014: Área, producción y rendimiento agrícola del área cosechada*. Departamento Administrativo Nacional de Estadística.
- Dell, M., Jones, B., & Olken, B. (2012). Temperature shocks and economic growth: Evidence from the last half century. *American Economic Journal: Macroeconomics*, 4(3), 66 - 95.
- Desli, E., & Gkoulgkoutsika, A. (2020). World economic convergence: Does the estimation methodology matter? *Economic Modelling*, 91, 138 - 147.
- Díaz, A., Rubiera, F., Pires, M., & Gomes, A. (2017). Convergence in Brazil: New evidence using a multilevel approach. *Applied Economics*, 49(50), 5050 - 5062.
- Duque, J., García, G., Lozano, N., Quiñones, M., & Montoya, K. (2023). Inequality and space in a highly unequal country: What does the literature tell us in the context of Colombia? *Regional Science Policy & Practice*, 15(9), 2065 - 2087.
- Egert, B., Botev, J., & Turner, D. (2020). The contribution of human capital and its policies to per capita income in Europe and the OECD. *European Economic Review*, 129.
- Elhorst, J. (2014). *Spatial econometrics: from cross-sectional data to spatial panels*. Heidelberg: Springer.
- Feng, P., Yasar, M., & Rejesus, R. (2023). Innovation and regional economic convergence: evidence from China. *The Annals of Regional Science*, 1 - 25.
- Feyrer, J. (2007). Demographics and productivity. *The Review of Economics and Statistics*, 89(1), 100-109.
- Galvis, L. (2019). Geografía económica del Caribe colombiano. *Economía & Región*, 4(1), 7 – 45.

- Galvis, L., & Hahn, L. (2015). Crecimiento municipal en Colombia: el papel de las externalidades espaciales, el capital humano y el capital físico. *Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional*(216), 1 - 60.
- Galvis, L., & Meisel, A. (2010). Persistencia de las desigualdades regionales en Colombia: Un análisis espacial. *Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional y Urbana*, No. 120.
- Galvis, L., & Meisel, A. (2013). Regional Inequalities and Regional Policies in Colombia: The Experience of the Last Two Decades. En J. Cuadrado, & P. Aroca, *Regional Problems and Policies in Latin America. Advances in Spatial Science*. Springer.
- Galvis, L., Galvis, W., & Hahn, L. (2017). Una revisión de los estudios de convergencia regional en Colombia. *Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional y Urbana*(264).
- Galvis, L., Moyano, L., & Alba, C. (2016). La persistencia de la pobreza en el Pacífico colombiano y sus factores asociados. *Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional y Urbana*, No. 238.
- Gómez, C. (2006). Convergencia Regional en Colombia: Un Enfoque en los Agregados Monetarios y en el Sector Exportador. *Ensayos Sobre Economía Regional Número 45*.
- Gómez, F., & Santana, L. (2016). Convergencia interregional en Colombia 1990-2013: un enfoque sobre la dinámica espacial. *Ensayos Sobre Política Económica*, 34(80), 159 - 174 . doi:10.1016/j.espe.2016.03.004
- Gornall, J., Betts, R., Burke, E., Clark, R., Camp, J., Willett, K., & Wiltshire, A. (2010). Implications of Climate Change for Agricultural Productivity in the Early Twenty-First Century. *Philosophical Transactions of the Royal Society of Biological Sciences*, 365(1554), 2973 - 89.
- Henseler, M., & Schumacher, I. (2019). The impact of weather on economic growth and its production factors. *Climatic change*, 154(3), 417 - 433.
- Hsiang, S. (2016). Climate econometrics. *Annual Review of Resource Economics*, 8, 43 - 75.
- IDEAM. (2015). *Estudio Nacional del Agua 2014*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IPCC. (2007). *IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007*.
- Jin, H., Qian, Y., & Weingast, B. (2005). Regional decentralization and fiscal incentives: Federalism, Chinese style. *Journal of public economics*, 89(9-10), 1719 - 1742.
- Kahn, M., Mohaddes, K., Ng, R., Pesaran, M., Raissi, M., & Yang, J. (2021). Long-term macroeconomic effects of climate change: A cross-country analysis. *Energy Economics*(104).
- Källström, J. (2012). *An empirical study of regional convergence, inequality, and spatial dependence in the enlarged European Union*. Lund University School of Economics and Management.
- Khan, M., & Rashid, A. (2022). (A)symmetry effects of climate changes on economic growth: a panel data analysis. *International Review of Economics*, 69(4), 571 - 607.
- Kotosz, B., & Lengyel, I. (2017). *Regional growth and convergence of the nuts 3 regions of eastern european countries*. Groningen: In 57th ERS Congress: Social Progress for Resilient Regions.

- Krugman, P. (1991). Increasing returns and economic geography. *Journal of political economy*, 99(3), 483 - 499.
- Kuscevic, C., & del Río Rivera, M. (2013). Convergencia en Bolivia: un enfoque espacial con datos de panel dinámicos. *Revista de economía del Rosario*, 16(2), 233 - 256.
- Lachaud, M., Bravo, B., & Ludena, C. (2022). Economic effects of climate change on agricultural production and productivity in Latin America and the Caribbean la en América Latina y el Caribe (ALC). *Agricultural Economics*, 53(2), 321 - 332.
- LeSage, J., & Pace, R. (2009). *Introduction to spatial econometrics*. Boca Raton: Taylor & Francis CRC Press.
- Maccini, S., & Yang, D. (2009). Under the weather: Health, schooling, and economic consequences of early-life rainfall. *American economic review*, 99(3), 1006 - 1026.
- Malhi, Y., Franklin, J., Seddon, N., Solan, M., Turner, M., Field, C., & Knowlton, N. (2020). Climate change and ecosystems: threats, opportunities and solutions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1794).
- Mankiw, G., Romer, D., & Weil, D. (1992). A contribution to the empirics of economic growth. *Quarterly Journal of Economics*, 107(2), 407 - 437.
- Martens, W., Niessen, L., Rotmans, J., Jetten, T., & McMichael, A. (1995). Potential impact of global climate change on malaria risk. *Environmental Health Perspectives*, 103(5), 458 - 464. doi:10.1289/ehp.95103458
- Martínez, J., & Robert, M. (2006). Fiscal Decentralization, Macrostability, and Growth. *Revista de Economía Pública*, 179, 25–49.
- Mbow, C., Rosenzweig, C., Barioni, L., Benton, T., Herrero, M., Krishnapillai, M., . . . Xu, Y. (2019). Food Security. En P. Shukla, J. Skea, E. Calvo, V. Masson, H. Pörtner, D. Roberts, . . . j. Malley, *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Press.
- Meisel, A. (1993). Polarización o convergencia? A propósito de Cárdenas, Pontón y Trujillo. *Coyuntura económica*, 23(2).
- Meisel, A., & Hahn, L. (2020). Regional Economic Inequality in Colombia, 1926–2018. En D. Tirado, M. Badia, & H. Willebald, *Time and Space: Latin American Regional Development in Historical Perspective*. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-47553-6_8
- Meisel, A., Bonilla, L., & Sánchez, A. (2013). Geografía económica de la Amazonia colombiana. *Documentos de trabajo sobre economía regional No. 193*.
- Moncada, J., & Loiza, O. (2013). Análisis de las disparidades regionales en Colombia: una aproximación desde la estadística espacial, 1985-2010. *Borradores Departamento de Economía*, 52, 1 - 38.
- Mukherjee, K., & Ouattara, B. (2021). Climate and monetary policy: do temperature shocks lead to inflationary pressures? *Climatic Change*, 167(32). doi:doi:10.1007/s10584-021-03149-2

- Narayan, P., & Narayan, S. (2010). Carbon dioxide emissions and economic growth: Panel data evidence from developing countries. *Energy Policy*, 38(1), 661 – 666 . doi:10.1016/j.enpol.2009.09.005
- Ortiz, A., Ault, T., Carrillo, C., Chambers, R., & Lobell, D. (2021). Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. *Nature Climate Change*, 11(4), 306 – 312 . doi:doi:10.1038/s41558-021-01000-1
- Paglialunga, E., Coveri, A., & Zanfei, A. (2022). Climate change and within-country inequality: New evidence from a global perspective. *World Development*(159).
- Pande, R., & Enevoldsen, N. (2021). Growing pains? A comment on “Converging to Convergence”. *National Bureau of Economic Research*(No. w29046).
- Park, C., & Mercado, R. (2020). Economic convergence, capital accumulation, and income traps: empirical evidence. *Review of Income and Wealth*, 66(1), 26 - 58.
- Peiró, J., Prieto, W., & Tortosa, E. (2023). Regional income convergence in Colombia: population, space, and long-run dynamics. *Ann Reg Sci*, 70, 559–601. doi:https://doi.org/10.1007/s00168-022-01163-5
- Perera, A., Nik, V., Chen, D., Scartezzini, J., & Hong, T. (2020). Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems. *Nature Energy*, 5(2), 150 - 159.
- Quah, D. (1996). Empirics for economic growth and convergence. *European Economic Review*, 40(6), 1353 - 1375.
- Rabassa, M., Skoufias, E., & Jacoby, H. (2012). Weather and Child Health in Rural Nigeria. *World Bank Policy Research, Working Paper 6214*.
- Rey, S., & Montouri, B. (1999). US Regional Income Convergence: A Spatial Econometric Perspective. *Regional Studies*, 33(2), 143 - 156.
- Royuela, V., & García, G. (2013). Economic and Social Convergence in Colombia. *Regional Studies*, 49(2), 219 – 239. doi:10.1080/00343404.2012.762086
- Siabato, W., & Guzmán, J. (2019). La autocorrelación espacial y el desarrollo de la geografía cuantitativa. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 28(1), 1-22.
- Szeles, M., & Muñoz, R. (2016). Analyzing the regional economic convergence in Ecuador. Insights from parametric and nonparametric models. *Romanian Journal of Economic Forecasting*, 19(2), 43 - 65.
- Tebaldi, E., & Alda, E. (2017). Quality of Institutions and Violence Incidence: A Cross-Country Analysis. *Atlantic Economic Journal*(45), 365 - 384.
- Theil, H. (1967). Economics and Information Theory. *Studies in Mathematical and Managerial Economic*, 7.
- Unidad de Investigación Climática de la Universidad de East Anglia. (2021). *Unidad de Investigación Climática (CRU) Serie temporal (TS) versión 4.05 de datos en cuadrícula de alta resolución de la variación mensual del clima (enero de 1901-diciembre de 2020)*. CRU.

Viloria, J. (2009). Geografía económica de la Orinoquia. *Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional y Urbana; No. 113*.

Weiskopf, S., Rubenstein, M., Crozier, L., Gaichas, S., Griffis, R., Halofsky, J., . . . Whyte, K. (2020). Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. *Science of The Total Environment, 733*. doi:doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137782

(w) Gasto/l. tributario							(0.007) 0.006***
(w) Índice envejecimiento							(0.002) -0.033***
(w) #Estudiantes/docentes							(0.006) -0.002
(w) Densidad poblacional							(0.002) 0.0005*
							(0.0003)
λ				0.046 (0.067)		-0.426*** (0.135)	0.062 (0.071)
ρ					0.143** (0.070)	0.521*** (0.097)	
Velocidad de convergencia (%)	0,45%	9,58%	0,95%	9,61%	9,78%	9,69%	9,83%
Vida media (años)	155,35	7,24	72,82	7,22	7,09	7,15	7,05
			Prueba LM de dependencia espacial				
LM Lag	1,864	0.424	1,611				
LM Error	2,096	1.875	1,316				
LM Lag Robusto	0,046	2.953*	0,492				
LM Error Robusto	0,279	4.404**	0,196				
N	384	384	384	384	384	384	384

Notas: Errores estándar entre paréntesis. Velocidad de convergencia $\ln(1 - T\beta) / T =$, Vida media = $\ln(2) / \text{Velocidad de convergencia}$ ***p<0.01, **p<0.05, *p<0.1. Se estiman errores estándar robustos utilizando el método de Arellano (1987), dado que al realizar el test de Breusch-Godfrey/Wooldridge para autocorrelación general, se rechaza la hipótesis nula de ausencia de correlación serial en los residuos.

Tabla 9. prueba F restringida

Estadístico F	p-valor
5.316	0.0000000000000000871

Nota: Hipótesis alternativa: todos los interceptos diferenciales son iguales a cero.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Test de Hausman

Chi-cuadrado	p-valor
106.26	0.0000000000000000022

Nota: Hipótesis alternativa: Un modelo es inconsistente.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Test de Hausman para modelos espaciales

Modelo	Chi-cuadrado	p-valor
SARFE – SARRE	114.57	0.00000000000000022
SEMFE – SEMRE	122.3	0.00000000000000022
SACFE – SACRE	119.73	0.00000000000000022
SDMFE – SDMRE	231.98	0.00000000000000022

Nota: Hipótesis alternativa: Un modelo es inconsistente.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Efectos indirectos directos e indirectos de las regresiones SAR, SAC y SDM: Estimaciones completas

	SAR			SAC			SDM		
	ED	EI	ET	ED	EI	ET	ED	EI	ET
Ln PIB per cápita (t-1)	-0.197*** (0.023)	-0.009 (0.016)	-0.206*** (0.029)	-0.208*** (0.022)	0.067*** (0.019)	-0.140*** (0.022)	-0.205*** (0.021)	-0.014 (0.018)	-0.219*** (0.027)
Temperatura	0.094** (0.041)	0.004 (0.008)	0.098** (0.044)	0.082** (0.038)	-0.026* (0.014)	0.055** (0.026)	0.102* (0.054)	0.007 (0.010)	0.109* (0.058)
Temperatura2	-0.144*** (0.039)	-0.007 (0.012)	-0.151*** (0.042)	-0.125** (0.060)	0.040* (0.021)	-0.084** (0.043)	-0.096 (0.062)	-0.006 (0.011)	-0.103 (0.070)
Ln PIB per cápita (t-1)*	-0.033** (0.016)	-0.001 (0.003)	-0.034** (0.017)	-0.023 (0.014)	0.008 (0.005)	-0.016 (0.010)	-0.044** (0.018)	0.003 (0.004)	-0.047** (0.020)
Temperatura	-0.565** (0.270)	-0.027 (0.048)	-0.593* (0.287)	-0.772*** (0.285)	0.250** (0.111)	-0.522** (0.202)	-0.608** (0.277)	-0.040 (0.065)	-0.648** (0.306)
Ln Precipitación	0.040** (0.018)	0.002 (0.003)	0.042** (0.019)	0.057*** (0.019)	-0.018** (0.008)	0.038*** (0.014)	0.045** (0.019)	0.003 (0.005)	0.048** (0.021)
Ln Precipitación2	-0.003 (0.003)	-0.0001 (0.0003)	-0.003 (0.003)	-0.00003 (0.003)	0.00001 (0.001)	-0.00002 (0.002)	-0.001 (0.003)	-0.0001 (0.0004)	-0.001 (0.004)
T. homicidios (Q)	0.003** (0.001)	0.0001 (0.0002)	0.003** (0.001)	0.002** (0.001)	-0.0007** (0.0004)	0.002** (0.001)	0.003** (0.001)	0.0002 (0.0002)	0.003* (0.001)
Gasto/l. tributario	0.015*** (0.004)	0.0007 (0.001)	0.015*** (0.005)	0.023*** (0.005)	-0.007*** (0.002)	0.016*** (0.004)	0.032*** (0.006)	0.002 (0.003)	0.034** (0.007)
Índice envejecimiento	-0.002 (0.001)	-0.0001 (0.0002)	-0.002 (0.002)	-0.001 (0.002)	0.0006 (0.001)	-0.001 (0.001)	-0.003* (0.002)	-0.0002 (0.0003)	-0.003* (0.002)
#Estudiantes/docentes	-0.00001 (0.0001)	-0.00001 (0.00001)	-0.00001 (0.0001)	-0.00007 (0.0001)	0.00002 (0.00003)	-0.00004 (0.0001)	0.00001 (0.0001)	0.00001 (0.00001)	0.00001 (0.0001)
Densidad poblacional									

Nota: ED: Efectos directos; EI: Efectos indirectos; ET: Efectos totales. Errores estándar entre paréntesis.

***p<0.01, **p<0.05, *p<0.1