

Efectos del **CAMBIO CLIMÁTICO** en el crecimiento económico de México

Armando Sánchez Vargas



EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO
EN EL CRECIMIENTO ECONÓMICO
DE MÉXICO



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Dr. Enrique Graue Wiechers

Rector

Dr. Leonardo Lomelí Vanegas

Secretario General

Dr. Luis Agustín Álvarez Icaza Longoria

Secretario Administrativo

Dra. Guadalupe Valencia García

Coordinadora de Humanidades



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ECONÓMICAS

Dr. Armando Sánchez Vargas

Director

Dra. Isalia Nava Bolaños

Secretaria Académica

Ing. Patricia Llanas Oliva

Secretaria Técnica

Mtra. Graciela Reynoso Rivas

Jefa del Departamento de Ediciones

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL CRECIMIENTO ECONÓMICO DE MÉXICO

Armando Sánchez Vargas



Primera edición digital pdf, febrero 2021

D.R. © UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
Ciudad Universitaria, Coyoacán,
04510, Ciudad de México.
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ECONÓMICAS
Circuito Mario de la Cueva s/n,
Ciudad de la Investigación en Humanidades,
04510, Ciudad de México.

ISBN: 978-607-30-4246-8

DOI: <https://doi.org/10.22201/iiec.9786073042468e.2021>

Programa de Apoyo a Proyectos para Innovar y Mejorar la Educación
(PAPIME) PE310919: Construcción de modelos para la simulación
de escenarios de política económica en México: un enfoque macro-
econométrico.

Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica
(PAPIIT) IN302419: Evaluación de impacto del programa de Desayunos
Escolares en la obesidad y los logros educativos de niñas y niños de la
Ciudad de México.

Diseño de portada: Victoria Jiménez.
Cuidado de la edición: Héliida De Sales Y.

Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin
la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

Hecho en México.

AGRADECIMIENTOS

Este libro es resultado colateral del Programa de Apoyo a Proyectos para Innovar y Mejorar la Educación (PAPIME) PE310919, y del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) IN302419, ambos de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM.

El autor agradece al Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM por los datos utilizados en este libro.* Particularmente, al doctor Francisco Estrada Porrúa por permitirnos utilizar sus datos sobre temperatura y precipitación para la estimación de los modelos econométricos. También, se agradece el financiamiento otorgado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), a cargo de la doctora Amparo Martínez, y al maestro Miguel Breceda de la Unidad de Cambio Climático y Economía.

Por otro lado, el autor agradece a Anadeli Naranjo Carbal, Xhail Balam de León, Débora Martínez Ventura, Marisol Amado Ruiz, Ruth Martínez Ventura, Gonzalo Curiel Vázquez, Lizeth Guerrero González y a Raúl Orozco por su asistencia técnica.

Las opiniones y los resultados expuestos en este libro son del autor y no representan el punto de vista de la institución donde labora o de las instituciones que otorgaron los datos o el financiamiento.

* Este documento se basa en los resultados del "Informe final de la evaluación de los efectos del cambio climático en el crecimiento económico de México", publicado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) México-INECC.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	9
1. MARCO TEÓRICO	15
2. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA	33
3. METODOLOGÍA	37
4. EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN NIVELES ESTATAL Y NACIONAL	53
CONCLUSIONES	77
ANEXOS	81
Anexo A.1. Supuestos de los escenarios de temperatura y precipitación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático	83
Anexo A.2. Fuentes de información	84
Anexo A.3. Relación del PIB per cápita y temperatura	85
Anexo A.4. Pruebas de raíces unitarias	89
Anexo A.5. Pruebas de especificación correcta de los modelos de corrección de error	93
Anexo A.6. Pruebas de los modelos tipo panel	97
Anexo B.1. Crecimiento del PIB per cápita de acuerdo con escenarios de temperatura y precipitación nacional	101
REFERENCIAS	103

INTRODUCCIÓN

El concepto de *clima*¹ se refiere al comportamiento promedio de largo plazo de las condiciones atmosféricas: temperatura, humedad, precipitación y viento. El concepto de *cambio climático* alude al cambio en las medias de largo plazo de dichos componentes atmosféricos [NASA, 2011]. Con base en la observación de series de tiempo históricas, ha sido posible detectar cambios significativos en las condiciones climáticas alrededor del mundo. Por ejemplo, la temperatura promedio ha sufrido un

¹ El autor agradece los comentarios del dictaminador sobre incluir las diferencias entre las definiciones de *clima*, *cambio climático*, *eventos climáticos extremos* y *variabilidad climática*; que se utilizarán a lo largo de los capítulos del libro. Todas las definiciones se tomaron del glosario de términos del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) [2013]. De acuerdo con el IPCC, el *clima* en el sentido más amplio se refiere al estado del sistema climático (atmósfera, hidrósfera, criósfera, litósfera y biósfera, y las interacciones entre ellos) en términos clásicos y estadísticos. Es decir, es una descripción estadística del tiempo atmosférico en términos de valores medios y de variabilidad de magnitudes, como la temperatura, la precipitación o el viento, durante un periodo largo. Por otro lado, el *cambio climático* se define como la variación del clima medido por cambios en la media o en la variabilidad de sus propiedades que persisten en el tiempo. El cambio puede originarse de procesos naturales o forzamientos externos, como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos (directa o indirectamente atribuibles a las actividades humanas), que alteran la composición de la atmósfera o del uso del suelo. Los eventos climáticos extremos, mejor conocidos como fenómenos meteorológicos extremos, son fenómenos meteorológicos raros dentro de su distribución estadística de referencia en un lugar y tiempo determinados. De acuerdo con el IPCC, un fenómeno meteorológico extremo es aquel que es más raro que el percentil 10° o 90°, es decir, su intensidad es inusual o extrema. Finalmente, la variabilidad climática hace referencia a las variaciones del estado medio y otras características estadísticas del clima —desviación estándar, frecuencia de fenómenos extremos, coeficiente y varianzas, entre otros—, en las escalas espaciales y temporales más amplias que las de los fenómenos meteorológicos. Como se mencionó, la variabilidad puede deberse a procesos naturales del sistema climático (interna) o a variaciones del forzamiento externo natural o antropogénico (externa).

considerable aumento en el último siglo, presentando los mayores cambios en las tres últimas décadas. En cuanto al ciclo del agua, las transformaciones no han sido uniformes en todas las regiones, de manera que existen zonas que sufren sequías drásticas y otras donde las precipitaciones extremas se han acentuado.

Si bien la variabilidad climática tiene un componente natural, investigaciones previas a este estudio demuestran que una parte de los cambios en las condiciones climáticas están asociada con las actividades antropogénicas [Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2014a]. Los principales estudios al respecto indican que el cambio climático será mayor en las siguientes décadas y se manifestarán otros importantes cambios en el clima durante el siglo XXI [Nordhaus, 1991]. En cuanto a los impactos económicos de este proceso climático, se sabe que el aumento de las temperaturas y la variabilidad en los patrones de lluvia frenarán el crecimiento de los países, complicarán la reducción de la pobreza y ampliarán la inseguridad alimentaria.

En este contexto, la medición de los impactos económicos globales del cambio climático aún representa un gran reto [Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2014a]. Los estudios sobre dichos impactos en México son agregados y se enfrentan a la incertidumbre, además de incluir dificultades metodológicas [Estrada *et al.*, 2013].

Por ello, el objetivo principal de este estudio es realizar una evaluación cuantitativa de los efectos del cambio climático en el crecimiento económico de México a escala nacional, subnacional y bajo diferentes escenarios de cambio climático. Se analiza la relación que existe entre el crecimiento del producto interno bruto per cápita (PIB per cápita) y las variables climáticas de temperatura y precipitación. El estudio comprende dos tipos de estimaciones: impactos y escenarios. Los resultados del impacto se refieren a una relación causal, es decir, representan en el PIB su elasticidad (sensibilidad)-temperatura y su

elasticidad-precipitación. Dicha relación se estima por medio de un modelo de regresión para el periodo 1940-2013. Cabe destacar que la elasticidad es la respuesta porcentual de una variable endógena ante un cambio porcentual en una variable exógena. Por ejemplo, la elasticidad-temperatura se interpretaría como la variación del PIB debido a un cambio en la temperatura, ambos en términos porcentuales.

Por otra parte, creamos escenarios con base en los resultados de impacto, contemplamos las ocho proyecciones de temperatura y precipitación desarrolladas por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), y se proyectan para el periodo 2014-2100.

La metodología empleada para la estimación de los impactos incluye series de tiempo mediante modelos de corrección de error (ECM, por sus siglas en inglés); con base en esas estimaciones se realizan simulaciones de crecimiento económico para el año 2100 en el contexto de las ocho diferentes vías de concentración representativas (RCP, *representative concentration pathways*), que consisten en proyecciones de la temperatura y precipitación desarrolladas por el IPCC. Para corroborar la robustez de los resultados obtenidos con series de tiempo, se incorporó la metodología de panel. Se estiman modelos de panel dinámico con efectos fijos que permiten el control por la heterogeneidad estatal y obtener estimaciones sin sesgo del impacto del cambio climático. Con heterogeneidad nos referimos a las diferencias en las características observables y no observables que hay en los estados, por ejemplo, la altitud, la presión atmosférica, entre otras.

Los resultados de impacto para los 32 estados analizados muestran que un aumento de 1 °C en la temperatura media podría reducir el PIB per cápita nacional en un rango entre -0.77 y -1.76 %, de acuerdo con los datos observados durante el periodo 1940-2013. El estudio también muestra que

existe heterogeneidad en los impactos entre las diferentes entidades federativas. El estado con mayor vulnerabilidad ante cambios en la temperatura es Baja California (-7.52%) y el de menor vulnerabilidad es Sinaloa (-0.33 por ciento).

En términos de la variación en la precipitación, un aumento de 1 mm en la misma generaría una pérdida del PIB per cápita de -0.01 y -0.04% . Coahuila es el estado con mayor reducción en su PIB per cápita (-0.27%), como consecuencia de la variación en la precipitación.

Por su parte, los escenarios económicos del estudio muestran que los cambios en las variables climáticas, que se proyectan para finales del siglo XXI, tendrían como consecuencia una caída en la tasa de crecimiento del PIB per cápita en el periodo 2014-2100, esto tanto a nivel nacional como para todos los estados. De acuerdo con las simulaciones, los cambios en la temperatura podrían disminuir el crecimiento del PIB per cápita del país entre 1.96 y 2.03% hacia el año 2100. Por su parte, el cambio en la precipitación quizá reduzca el crecimiento en un rango de -1.03 y -1.66% para el mismo periodo.

Los resultados de este estudio se encuentran en función de la calidad y disponibilidad de los datos climáticos y económicos, lo cual es una de las limitantes de la investigación. Sin embargo, las estimaciones realizadas mediante modelos de panel confirman la robustez de los datos obtenidos por modelos de series de tiempo. Ambos resultados muestran que los cambios en la temperatura y en la precipitación tendrán efectos negativos sobre el crecimiento económico per cápita del país. Estos hallazgos nos permiten señalar la importancia del impulso a las políticas de control y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). El desarrollo de estas políticas permitirá, además de la sustentabilidad ambiental, una mejor promoción del crecimiento económico. Asimismo, la existencia de impactos heterogéneos de cambio climático en el ámbito estatal implica que la política climática también debe

ser diferenciada. Esto es, cada estado de la República Mexicana necesita adoptar diferentes políticas de adaptación y de mitigación ante el cambio climático.

El libro se encuentra estructurado como sigue. El capítulo 1 revisa los principales hallazgos de los estudios previos en términos de impactos y proyecciones del cambio climático. El capítulo 2 presenta un resumen estadístico de la relación entre la temperatura y la precipitación con respecto al crecimiento económico. El capítulo 3 desarrolla la metodología econométrica. Los resultados de impacto y las proyecciones de crecimiento se presentan en el capítulo 4. Por último, se encuentra la conclusión del libro.

1. MARCO TEÓRICO

La relación entre las variables económicas y climáticas se ha estudiado desde diferentes criterios en las últimas décadas. Los primeros trabajos en torno a este tema se centraron en analizar cómo el crecimiento económico está determinado no solo por las variables económicas, sino también por las condiciones climáticas y geográficas que históricamente han caracterizado a los países. Por ejemplo, existe evidencia empírica de que las naciones que se ubican en zonas donde las temperaturas son altas, comúnmente alrededor de los trópicos, tienen ingresos más bajos que los países localizados en zonas con temperaturas templadas.

Así, en la literatura económica ha surgido el interés de analizar cómo el cambio climático podría incidir en el bienestar de las poblaciones y el crecimiento económico de las naciones. Esta relación se ha medido, principalmente, en cuanto al impacto en el producto per cápita en las distintas economías. Sin embargo, también se han llevado a cabo estimaciones del impacto del cambio climático en el PIB para diferentes grupos de países y para los distintos sectores productivos como la industria, el campo y las ciudades.

RELACIÓN ENTRE EL CAMBIO CLIMÁTICO, LA GEOGRAFÍA Y EL CRECIMIENTO ECONÓMICO GLOBAL

Diversos estudios han analizado la importancia del clima y la ubicación geográfica en el crecimiento de las economías. Al respecto, Gallup *et al.* [1999] examinan la relación entre variables geográficas y macroeconómicas para un conjunto de

150 países. Lo anterior con la finalidad de determinar si los aspectos geográficos son un determinante del crecimiento económico. Para ello, emplean un modelo económico basado en una función de producción, controlando sus estimaciones econométricas mediante variables de tipo económico, político e institucional, además de las de tipo geográfico. En este estudio, se establece que la localización y el cambio climático, medidos por las modificaciones en la temperatura y en la precipitación, se relacionan de manera significativa con el nivel de ingresos de los países, así como con su tasa de crecimiento. De manera específica, los autores identificaron que las economías situadas cerca de los trópicos son, casi en su totalidad, pobres y que los países con alto ingreso se ubican, en su mayoría, en las latitudes medias y altas. Los autores sugieren que los canales mediante los cuales el cambio climático incide sobre la economía son: el costo del transporte, la carga por enfermedades y la productividad del sector agrícola.

Por otro lado, Horowitz [2009] revisa la relación histórica entre las variaciones en la temperatura, y el PIB per cápita para el grupo de los 100 países más poblados. En el análisis se aplica un modelo de crecimiento del tipo de Solow-Swan, que incluye la temperatura como una variable relevante. Los resultados sugieren que, en promedio, los países que presentan mayores temperaturas son también más pobres que aquellos con temperaturas más bajas.

Sachs [2001] presenta evidencia notable de la importancia de la geografía en el desarrollo económico de las naciones. La hipótesis que desarrolla en su trabajo señala que los países situados en los trópicos tienen un menor desarrollo económico, en comparación con aquellos que se ubican fuera de esta zona geográfica. Uno de sus principales hallazgos es que existen diferencias importantes en el ingreso per cápita por zonas climáticas. Las naciones ubicadas en la región de los trópicos son, en su mayoría, economías pobres, mientras que

los países situados a mayores distancias de los trópicos presentan un mejor nivel económico.

Existen otros modelos que se encuentran en la vanguardia del análisis de la relación entre el cambio climático y la economía: los modelos de circulación general (MCG), que han servido de materia prima para los escenarios climáticos de manera muy exitosa [Nakicenovic, Lempert y Janetos, 2013]. La ventaja de los MCG es que los flujos de la información que utilizan van en muchas direcciones y tienen la retroalimentación de comunidades de investigación, que son investigadores de mitigación, modeladores climáticos y de adaptación y vulnerabilidad. De hecho, estos modelos comenzaron a desarrollarse a partir de los escenarios de concentraciones atmosféricas que luego se dieron como insumos para los MCG cuyos resultados pudo utilizar la comunidad de investigación de los modelos de adaptación. El logro de incorporar las interacciones más rápidas entre las diversas comunidades de investigación climática ha sido importante por considerar la circularidad del fenómeno cambio climático y desarrollo económico.

Así, la literatura económica y experimental ha llegado a establecer la siguiente regularidad empírica respecto de la relación sobre la ubicación geográfica, el cambio climático y el crecimiento económico. No constituye una relación causal definitiva, solo es un hecho estilizado que avala los datos y que habría que estudiar de manera muy rigurosa para llegar a conclusiones definitivas al respecto.

Hallazgo de la literatura 1. La mayoría de los países pobres presentan temperaturas altas y se ubican en regiones tropicales. En contraste, casi todos los países ricos presentan temperaturas templadas y se localizan lejos de los trópicos.

Este hallazgo es importante porque implica que los países que son más vulnerables, por su nivel de pobreza, ante los efectos del cambio climático están ubicados en su mayoría en las zonas más cálidas del planeta. Esta situación es relevante para un análisis de la vulnerabilidad geográfica y el diseño de la política climática global.

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL CRECIMIENTO DEL PRODUCTO A NIVEL MUNDIAL

El estudio de los impactos económicos del cambio climático ha tenido gran relevancia en los últimos años. En una investigación importante de Tol [2009], se llevó a cabo una revisión de los principales documentos que han estimado los efectos económicos del cambio climático. El autor presenta los dos principales criterios que han sido utilizados en el análisis del tema: el método numerativo y el método estadístico. El primero consiste en estimar los efectos físicos del cambio climático. Estos se obtienen con base en investigaciones típicas de las ciencias naturales. Estas pueden basarse en la combinación de diversos modelos de evaluación de impacto del cambio climático, así como de experimentos de laboratorio. Una vez calculados los efectos físicos, se asigna a estos un precio y entonces puede determinarse el impacto económico. El segundo se basa en la estimación directa de modelos estadísticos sobre los efectos del cambio climático en el bienestar y en la producción de la economía. Ambos métodos presentan tanto ventajas como limitaciones.

El autor sugiere que los resultados de dichos estudios son consistentes a pesar de que emplean diferentes metodologías. Los principales resultados de las investigaciones indican que el mayor cambio esperado en la temperatura mundial es de 3 °C y con un impacto económico global máximo de 4.8 % del PIB. Con base en esos datos, Tol señala que el efecto económico del cambio climático es relativamente pequeño, lo que podría

tener implicaciones para la toma de decisiones de política climática mundial, sobre todo en cuanto a la reducción óptima de emisiones de gases de efecto invernadero.

Por otra parte, Dell, Jones y Olken [2009] examinan la relación existente entre la temperatura y el ingreso per cápita a nivel municipal para 12 países de América Latina. Estos autores proponen la estimación de un modelo econométrico con datos de sección cruzada. Sus resultados empíricos sugieren que un aumento de 1 °C en la temperatura se vincula con una disminución en el PIB per cápita municipal. Esta reducción se estima entre 1.2 y 1.9 % en el periodo 1950 a 2000.

Su principal conclusión es que existe una relación estadísticamente significativa entre el comportamiento de las temperaturas y el ingreso que perciben los individuos tanto entre países como al interior de estos. Esta conclusión tiene robustez estadística pues los resultados estadísticos del impacto son congruentes con las estimaciones obtenidas en su modelo econométrico previo [Dell *et al.*, 2008], basado en datos panel para un grupo de naciones.

Por otra parte, Horowitz [2009] propone un estudio sobre la relación entre la temperatura y los ingresos para diferentes países. Su análisis requería la separación de los efectos históricos y los contemporáneos. La consecuencia histórica de la temperatura puede representarse por medio de las tasas de mortalidad desde la época colonial, tal como lo sugiere el enfoque de las instituciones. Con dichos datos, el estudio realiza un pronóstico del impacto que tendría un aumento de 1 °C en la temperatura. Los resultados estiman que dicho aumento generaría una pérdida de 3.8 % del PIB mundial.

Barrios *et al.* [2010] estiman la relación entre el cambio climático y el crecimiento económico. De forma específica, buscan determinar la relación entre los patrones de precipitación y el crecimiento económico mediante un modelo de panel para un nutrido grupo de países pobres en la región de África

subsahariana. Este estudio se basa en un modelo de crecimiento económico neoclásico que utiliza la función de producción y en el que se asume la existencia de la convergencia condicional.

Los hallazgos del modelo apuntan a que la caída en el nivel de precipitación tiene una incidencia negativa sobre el crecimiento económico de los países africanos. No obstante, cuando los autores comparan los resultados de esta región con los de otras naciones en desarrollo encuentran que la relación no es así para los demás países analizados. Además, se estudian los canales mediante los cuales el nivel de precipitación incide sobre el producto de la región y hallan que existen dos principales medios de incidencia: la agricultura y el suministro de energía hidroeléctrica.

Nordhaus [2006] realizó un estudio en el que relacionó las variables geográficas y económicas. Su aportación más importante fue la incorporación de un análisis de la actividad económica mundial a un nivel de celdas con resolución de 1° latitud por 1° longitud. La estimación de los impactos del cambio climático se hace con base en la comparación de dos de los escenarios propuestos por el IPCC.

El primero asume un cambio de 3 °C y que la precipitación no mostrará cambios. El segundo plantea un cambio en la temperatura de 3 °C y una reducción en la precipitación de 15 % para el caso de las zonas a 500 km de distancia de la costa en las latitudes medias (latitud 20 a 50 norte y sur). Mientras que, en el caso de otras áreas, la precipitación aumenta un 7 %. Los resultados para el primer escenario demuestran que el impacto económico es de -0.93 y -1.73%; y en el segundo, los resultados se agravan considerablemente, con un efecto económico de hasta -2.95 por ciento.

Hallazgos de la literatura. Los fenómenos meteorológicos extremos, * asociados con el cambio climático, tienen efectos negativos y estadísticamente significativos sobre el crecimiento económico y bienestar de los países. De manera específica, el aumento en la temperatura y las modificaciones en los patrones de precipitación.

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SEGÚN EL NIVEL DE DESARROLLO DE LOS PAÍSES

Los resultados de Tol [2009] indican que los países más desarrollados son los que generan las mayores emisiones de GEI. Sin embargo, las naciones más pobres son las que enfrentan más riesgos como consecuencia del cambio en las temperaturas, dado su nivel de resiliencia ante los eventos (fenómenos meteorológicos) extremos asociados con el cambio climático.

Dell *et al.* [2012] estudian el impacto de las variaciones extremas de la temperatura sobre el producto de la economía. Para ello, especifican y estiman un modelo econométrico de panel para 125 países. Los resultados muestran que las temperaturas altas tienen efectos notablemente negativos en el crecimiento de las economías, principalmente en los países más pobres. También sugieren que las altas temperaturas reducen el crecimiento económico de las naciones pobres, de manera que un incremento de 1 °C provoca una reducción de 1.3 puntos porcentuales en el crecimiento de la economía.

Los efectos del cambio climático sobre la actividad económica han sido examinados por Jones y Olken [2010]. A diferencia de los otros estudios mencionados [Tol, 2014 y Dell *et al.*, 2008], el de Jones y Olken se concentra en los efectos directos sobre el nivel de exportaciones. Así, Jones y Olken encuentran que un incremento de 1 °C podría reducir el nivel de exportaciones de los países pobres entre 2 y 5.7 %. Mientras que en los países de mayor desarrollo parece no tener

* En el texto utilizamos el término “eventos climáticos extremos” para referirnos a los “fenómenos meteorológicos extremos” que son causados por el cambio climático.

incidencia. Cabe destacar que este efecto es relevante, pues una reducción en las exportaciones conduce a un deterioro de la balanza comercial y aumenta la vulnerabilidad ante ataques especulativos. En otras palabras, disminuye su resiliencia económico-financiera a nivel mundial.

Otro criterio empleado en la literatura es el de Schlenker, Henemann y Fisher [2006] que se enfoca en llevar a cabo un estudio sobre el valor de la tierra con uso agrícola en Estados Unidos. En este estudio se llevan a cabo estimaciones de las ganancias o pérdidas en el valor de la tierra que resultarían de variaciones en los patrones climáticos, si se toman como referencia los escenarios de cambio climático establecidos por el IPCC.

En general, los resultados de Schlenker para los diversos escenarios sugieren que el valor de la tierra podría experimentar desde ligeras ganancias (10 %) hasta pérdidas considerables (-25 %). Uno de sus hallazgos más robustos es que los impactos del cambio climático son heterogéneos entre regiones, siendo la más afectada la zona oeste del meridiano 100. Además, el número de condados que se alterarían superan a aquellos que presentan ganancias.

Hallazgo de la literatura 3. Los impactos del cambio climático son heterogéneos entre regiones. Los países, los estados y los municipios de menor desarrollo económico son los más vulnerables a los impactos del cambio climático.

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO POR SECTORES ECONÓMICOS

Uno de los temas que no ha sido suficientemente explorado en la literatura internacional y nacional es el posible impacto del cambio climático en el crecimiento económico a niveles sectorial y municipal. No obstante, ya existen ciertos hallazgos empíricos que permiten comenzar a caracterizar dichas relaciones para diversos países. En general, de acuerdo con

la literatura, el cambio climático podría tener efectos negativos sobre el crecimiento de los sectores económicos más importantes: agricultura y pesca, sector industrial, comercio y servicios [Dell *et al.*, 2012 y 2014]. También se ha encontrado que existen impactos negativos a nivel municipal y sobre factores como la salud, la mortalidad y la migración. A continuación, se resumen los principales hechos estudiados al respecto.

Agricultura y pesca

El sector agrícola podría verse afectado por los cambios en los patrones de lluvia y precipitación dada su alta dependencia de las condiciones climáticas [Gómez *et al.*, 2011]. De acuerdo con este estudio, uno de los efectos que el cambio climático podría generar es la modificación de la producción y la distribución de los cultivos. Las principales variables de superficie² que repercuten directamente sobre el sector agrícola son la variación en la disponibilidad de agua, el cambio en la velocidad y frecuencia del viento, el aumento en el número de horas de calor promedio y la ampliación de las zonas áridas.

Los autores estiman dos diferentes modelos de circulación atmosférica, con la finalidad de conocer el impacto del cambio climático sobre la producción agrícola del estado de Jalisco, México: los modelos GFDL-TR-90 y Hardley.³ En ambos, el horizonte temporal para la simulación es hasta 2050 e implica la utilización del escenario socioeconómico A2 del IPCC. Este escenario supone un gran crecimiento poblacional y uno lento en cuanto a economía se refiere (ver Anexo A.1). Los resultados de las variables de superficie muestran que ambos modelos conle-

² Las variables de superficie son la temperatura, precipitación o viento.

³ Los modelos de circulación general oceánica-atmosférica GFDL-TR-90 y Hardley-tr-00 establecen aumentos en la temperatura media anual en 1.3 °C y 1.8 °C, respectivamente.

van un incremento en la temperatura media anual.

Sin embargo, los resultados son más drásticos en el modelo Hadley que en el GFDL. El primero de estos muestra un cambio en la temperatura promedio de +1.8 °C, mientras que en el segundo el cambio es de +1.3 °C. En términos de la precipitación, esta tiene una caída de 3.3 % en el primero y de 0.6 % en el segundo. Ambos resultados generan como consecuencia una disminución en las áreas aptas para el cultivo de maíz.

Otro estudio para México es el de Gay *et al* [2006], quienes examinan la relación entre la producción de café y variables tanto económicas como climáticas, con la finalidad de hallar los impactos potenciales del cambio climático. Este estudio se basa en un modelo de regresión múltiple con un enfoque de función de producción. Los hallazgos muestran que los cambios en la temperatura promedio de las estaciones de verano e invierno tienen los mayores efectos negativos sobre la producción.

De hecho, los cambios en las temperaturas y en la precipitación podrían generar una caída de 34 % en la producción del café para el estado de Veracruz en un horizonte de simulación hasta el 2020. Asimismo, la caída de la producción de café quizá genere efectos negativos sobre las condiciones socioeconómicas de la población directamente involucrada en la producción. Por ejemplo, los ingresos de esta población disminuirían y, por consiguiente, el cultivo de dicho producto dejaría de ser económicamente viable.

Además, los autores señalan que las bajas condiciones económicas de los productores son una limitante para la instrumentación de alternativas de adaptación ante el cambio climático. Aún más, cualquier incremento en la temperatura incidiría de forma negativa sobre la producción de dicho cultivo.

Ahora bien, los impactos de la variabilidad climática sobre el sector agrícola se han estudiado para pocas regiones. Entre los estudios con perspectiva regional destaca el de Guiteras [2007], quien enfoca su análisis en el sector agrícola de la India. El autor sugiere que los impactos atribuibles al aumento en

las emisiones de CO₂ podrían ser diferentes según el tipo de cultivo (dado que cuando aumentan los niveles de CO₂ algunos de los cultivos incrementan su tamaño y lo hacen en menos tiempo). Sin embargo, existe mayor probabilidad de que los efectos finales del aumento en las temperaturas y de la mayor presencia de sequías sean adversos para el sector agrícola en su totalidad, lo cual resultará en que este sea cada vez más vulnerable.

Otros autores han encontrado resultados distintos en cuanto al efecto económico del cambio climático. Por ejemplo, Deschênes y Greenstone [2007], en su estudio para Estados Unidos, analizan el impacto sobre las ganancias del sector agrícola con un modelo de panel a nivel condado y mediante una estimación de efectos fijos. Los resultados muestran que los impactos en las ganancias de dicho sector son positivos derivado del cambio en la temperatura y en las precipitaciones. Tales ganancias representan un beneficio de 4 % anual en la agricultura.

Por otra parte, el reporte del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático [2014a] indica que el cambio climático generará efectos negativos sobre la seguridad alimentaria, principalmente en las regiones tropicales y templadas. Por lo cual, de no existir medidas de adaptación, los cultivos como el maíz, el trigo y el arroz se verán afectados de manera negativa. El informe también indica que a pesar de que podrían existir localidades que de modo individual se vean favorecidas por los cambios en la temperatura, el impacto global será negativo. Tol [2009] señala que los efectos a corto plazo del cambio climático son positivos en algunos casos aislados, sobre todo en los países alejados del trópico. No obstante, los efectos a largo plazo son con seguridad negativos.

Los impactos del cambio climático reflejados en otras actividades primarias, como la pesquera, también se han analizado. Un artículo de Belhabib *et al.* [2016] estudia esa relación para la región costera de África, tanto a nivel de

pesca artesanal como industrial. Los resultados muestran los efectos biológicos presentados a través de especies de aguas cálidas. Al mismo tiempo que los impactos económicos se presentan por el aumento en los costos de producción de la pesca, dado que los trabajadores deben desplazarse a lugares cada vez más lejanos para generar el mismo nivel de producto pesquero.

Hallazgo de la literatura⁴. El cambio climático altera de forma negativa al sector primario. Una de las actividades más afectadas es la agrícola debido a su alta dependencia de las condiciones climáticas. En el sector agrícola, el cambio climático podría favorecer algunas regiones en particular, pero el impacto global es negativo.

Sectores industrial, comercial y de servicios

Los impactos del cambio climático son más evidentes sobre las actividades productivas que se realizan a la intemperie, pero la literatura previa ha encontrado que los efectos se manifiestan inclusive en las actividades que se llevan a cabo en interiores y bajo circunstancias de temperaturas controladas. Tal es el caso del sector industrial y de servicios y comercio.⁴ Los hallazgos señalan que estos sectores se alteran principalmente por el impacto de la temperatura y precipitación sobre la productividad laboral.

Un estudio que relaciona la variación de las temperaturas

⁴ El sector industrial en México está compuesto por los sectores: 21 Minería, 22 Generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, suministro de agua y de gas por ductos al consumidor final, 23 Construcción y 31-33 Industrias manufactureras. Mientras que el de servicios comprende: 43 Comercio al por mayor, 46 Comercio al por menor, 48-49 Transportes, correos y almacenamiento, 51 Información en medios masivos, 52 Servicios financieros y de seguros, 53 Servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes muebles e intangibles, 54 Servicios profesionales, científicos y técnicos, 55 Corporativos, 56 Servicios de apoyo a los negocios y manejo de desechos y servicios de remediación, 61 Servicios educativos, 62 Servicios de salud y asistencia social, 71 Servicios de esparcimiento culturales y deportivos, y otros servicios recreativos, 72 Servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas, 81 Otros servicios excepto actividades gubernamentales, y 93 Actividades legislativas, gubernamentales, de impartición de justicia y de organismos internacionales y extraterritoriales.

y los ciclones con la productividad laboral es el de Hsiang [2010], el cual se enfoca en el análisis de 28 países de América Latina y el Caribe. Las estimaciones econométricas se llevan a cabo mediante el modelo de regresión múltiple. Sus resultados muestran que el producto de la economía reacciona a un aumento de la temperatura de forma negativa y muy similar a los cambios en la productividad laboral. Por lo anterior, se sugiere que los modelos de cambio climático deben incorporar la productividad laboral. Lo anterior con la finalidad de no omitir una variable importante en el modelo econométrico, ya que se podrían obtener estimaciones sesgadas del impacto del cambio climático en los diversos sectores.

Hsiang [2010] argumenta que un aumento de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ generaría pérdidas en el producto anual de los sectores no agrícolas de 2.4 %, las cuales son superiores a las del sector agrícola (-0.1% del producto económico). Los modelos que se centran en los impactos del cambio climático en este sector presentan una subestimación de costos, lo anterior debido a que muchas veces no contemplan la respuesta de los trabajadores al estrés térmico.

Dell *et al.* [2012] también estudian los efectos de las variaciones climáticas sobre los diferentes sectores de la economía. En el industrial, los autores encuentran que un aumento de las temperaturas incide de manera negativa sobre el crecimiento del producto. Al parecer esta relación surge únicamente en el caso de los países pobres, en los cuales se ha encontrado que un aumento de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la temperatura tiene como consecuencia una pérdida de 2.04 puntos porcentuales en el crecimiento del producto industrial. Uno de los principales canales mediante los cuales las temperaturas altas afectan a la industria, en dichos países, es la productividad laboral. Lo anterior porque, en general, son los países emergentes los que tienen menor acceso a sistemas de aire acondicionado y están más expuestos a los efectos de las altas temperaturas. Un estudio más específico es el de Cachon *et al.* [2012]. Esta

investigación analiza la relación causal de los fenómenos meteorológicos extremos sobre el sector de la industria automotriz. El análisis se basa en datos de 64 plantas automotrices de Estados Unidos por medio de un panel con datos semanales para 10 años.

Los autores buscan conocer si las variables de superficies climáticas tienen impactos, inclusive, en las actividades que se realizan en interiores y con sistemas de temperatura controlada en la industria de automóviles. Los resultados muestran que las semanas en que la temperatura supera los 32 °C por seis o siete días, la producción se reduce 8 % en promedio. Así, la mayor incidencia de eventos extremos, causados por el cambio climático, podrían generar una disminución importante en la producción industrial.

En términos del sector comercial, Jones y Olken [2010] examinan las consecuencias que el cambio climático tiene sobre el nivel de exportaciones para un panel de países. Su investigación demuestra que el efecto en las exportaciones es mayor al estimado por la literatura previa sobre el PIB global. Asimismo, el análisis de exportaciones se realiza con un mayor nivel de desagregación por sectores económicos.

El análisis ofrece evidencia de que, si bien los mayores efectos negativos se dan sobre el sector de exportaciones agrícolas, la manufactura también se altera por la variabilidad climática. En particular, el sector de las manufacturas ligeras es de los más afectados, pero no se encontraron relaciones de causalidad entre el cambio climático y la producción en la industria de manufacturas pesadas y el sector de producción de materias primas.

La relación entre las condiciones climáticas y la productividad laboral en el sector de servicios también ha sido de interés para la literatura previa [Niemelä *et al.*, 2002] y Federspiel *et al.*, 2004]. Ambos documentos analizan el efecto de la temperatura en la productividad de los trabajadores de dicho sector. En el primer estudio, se encontró una caída de

5 a 7 % en la productividad, en un contexto de elevadas temperaturas al interior de los locales en los que se ofrecen los servicios. En el segundo documento, se encontró una menor eficiencia cuando las temperaturas interiores sobrepasaron los 25.4 °C.

Hallazgo de la literatura 5. El cambio climático tiene impactos negativos sobre los sectores: industrial, comercial y de servicios. El principal canal de transmisión es el efecto en la productividad laboral.

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN OTRAS VARIABLES SOCIOECONÓMICAS

Deschênes y Moretti [2009] modelan el impacto de los eventos extremos en Estados Unidos sobre el comportamiento de otras variables socioeconómicas como la mortalidad y la migración. Los autores encuentran que las olas de calor están relacionadas con un aumento en el número de muertes de cada condado, aunque el efecto disminuye en cuanto termina la ola de calor, es decir, el efecto es de corto plazo. Sin embargo, en el caso de las olas de frío, se encontró que los impactos en la mortalidad de la población son más inmediatos, pero también persisten durante las semanas siguientes.

En el caso de la movilidad de los individuos, los resultados de Deschênes y Moretti [2009] muestran que existe una mayor probabilidad de que los desplazamientos se realicen hacia los estados que presentan un menor número de días de temperaturas de frío extremo. Los grupos de edad más afectados (adultos mayores y niños) son quienes tienden a realizar dicha movilidad. Los autores mencionan que los resultados son congruentes con el modelo de movilidad racional.

La relación entre las variables cambio climático y crecimiento económico se ha estudiado desde diferentes enfoques. El primero analiza la incidencia de las características geográficas y climáticas en el crecimiento económico de los países. Con respecto a dicha relación, la literatura previa ha encontrado que las naciones ubicadas en las zonas de los trópicos y cuyas temperaturas son altas, también son, por lo general, más pobres en relación con aquellos países localizados en zonas más alejadas de los trópicos y con temperaturas templadas. Sin embargo, este hallazgo no es una explicación causal, solamente es una regularidad empírica que aún queda pendiente de explicar.

Desde hace décadas, la literatura ha tenido especial interés en el estudio de los impactos socioeconómicos del cambio climático. Dicha relación se ha medido principalmente en términos del impacto en el producto global de las economías. Al respecto, la conclusión más relevante es que el aumento en la temperatura y las modificaciones en los patrones de precipitación, producidos por el cambio climático, podrían tener efectos negativos sobre el crecimiento económico y el bienestar de los países [Gallup *et al.*, 1999; Horowitz, 2009; Sachs, 2001]. Además, dicho impacto es heterogéneo, es decir, diferente en función del nivel de desarrollo de los países [Dell *et al.*, 2012; Tol, 2009; Jones y Olken, 2010]. Los hallazgos previos muestran que los países de menor desarrollo y los que se ubican en zonas cercanas a los trópicos son los más vulnerables a los impactos del cambio climático.

De igual manera, se ha encontrado que el cambio climático genera también efectos negativos en los diferentes sectores de la economía [Dell *et al.*, 2012; Dell *et al.*, 2014]. En este sentido, se han identificado impactos mayormente negativos en los sectores: agrícola, pesquero, industrial, comercial y de servicios. Por ejemplo, la agricultura es uno de los sectores más expuestos al cambio climático, debido a su alta dependencia de las

condiciones climáticas [Gómez *et al.*, 2011]. Algunas investigaciones apuntan a que el cambio climático podría favorecer algunas regiones en particular [Deschênes y Greenstone, 2007]; no obstante, casi todos los estudios coinciden en que el impacto global es negativo [Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2014a; Tol, 2009]. En cuanto a la pesca, el impacto es evidente por la migración de las especies hacia otras aguas y por el cambio en la variedad de estas, lo que genera mayores costos de desplazamiento para las personas dedicadas a dichas actividades [Belhabib *et al.*, 2016].

En términos de los sectores industrial, comercial y de servicios, la literatura señala que los efectos del cambio climático se transmiten, básicamente, por el impacto sobre la productividad laboral [Hsiang, 2010; Cachon *et al.*, 2012; Niemelä *et al.*, 2002; Federspiel *et al.*, 2004]. Lo anterior debido a que, en general, mayores temperaturas tienden a ocasionar estrés térmico en los trabajadores, aun cuando estos laboren en un ambiente con temperatura acondicionada. De igual modo, los cambios en la precipitación pueden provocar retrasos e incluso dificultades de acceso a los centros de trabajo.

Finalmente, la literatura del tema señala también que existen otras áreas en las cuales el cambio climático tiene incidencia. Entre ellas destacan: la mortalidad, la migración y la salud [Deschênes y Moretti, 2009]. De acuerdo con los estudios del tema, el impacto en estas variables genera a su vez costos y, por tanto, se transmite al sistema económico.

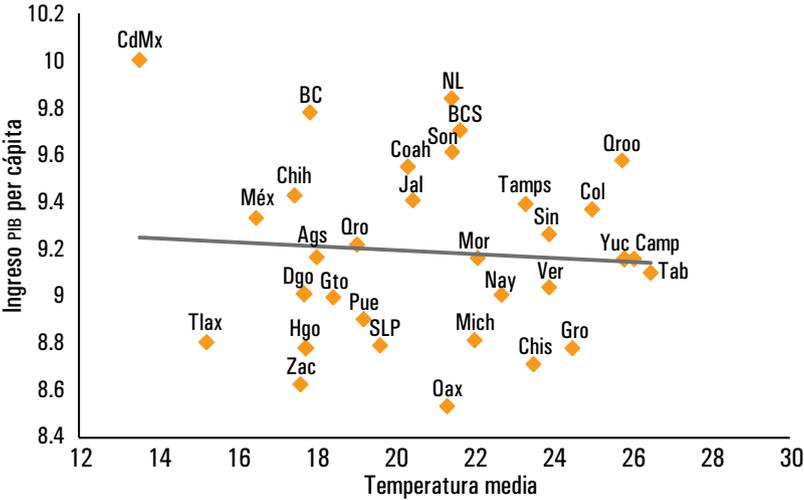
2. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

LA RELACIÓN ENTRE EL PRODUCTO INTERNO BRUTO (PIB) PER CÁPITA DE LOS ESTADOS
Y LAS VARIABLES DE SUPERFICIE CLIMÁTICA

Una de las regularidades empíricas en la literatura internacional es la existencia de una relación inversa entre los eventos meteorológicos extremos y la actividad económica. Como se concluye en la sección anterior, esta relación es frecuente también en el ámbito de los sectores económicos en diferentes regiones. Existe bastante trabajo sobre esta relación a nivel de países; sin embargo, no se han llevado a cabo muchos estudios a escala estatal o municipal en cada país. Así, en este estudio se busca analizar esta relación de forma desagregada para ofrecer evidencia estadística robusta, no solo de la dirección de esta relación, sino también de la misma magnitud. En la gráfica 2.1, se muestra la relación entre el promedio del ingreso per cápita por estado de la República Mexicana y el promedio de la temperatura⁵ para los 32 estados, en el periodo 1940-2013. Se observa que esta relación de los estados es inversa: a mayores temperaturas, el ingreso per cápita muestra menores valores. Este resultado se encuentra en el mismo sentido que lo propuesto por algunos estudios previos [Gallup *et al.*, 1999; Horowitz, 2009], los cuales han encontrado la existencia de esta relación. Por ejemplo, las regiones con climas más calurosos (temperaturas más altas) pueden presentar menor crecimiento económico (gráfica 2.1).

⁵ Los datos de temperatura y precipitación empleadas en esta sección se obtuvieron del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM. Para mayor información sobre las trayectorias estatales de la temperatura y precipitación, consulte <www.atmosfera.unam.mx/>.

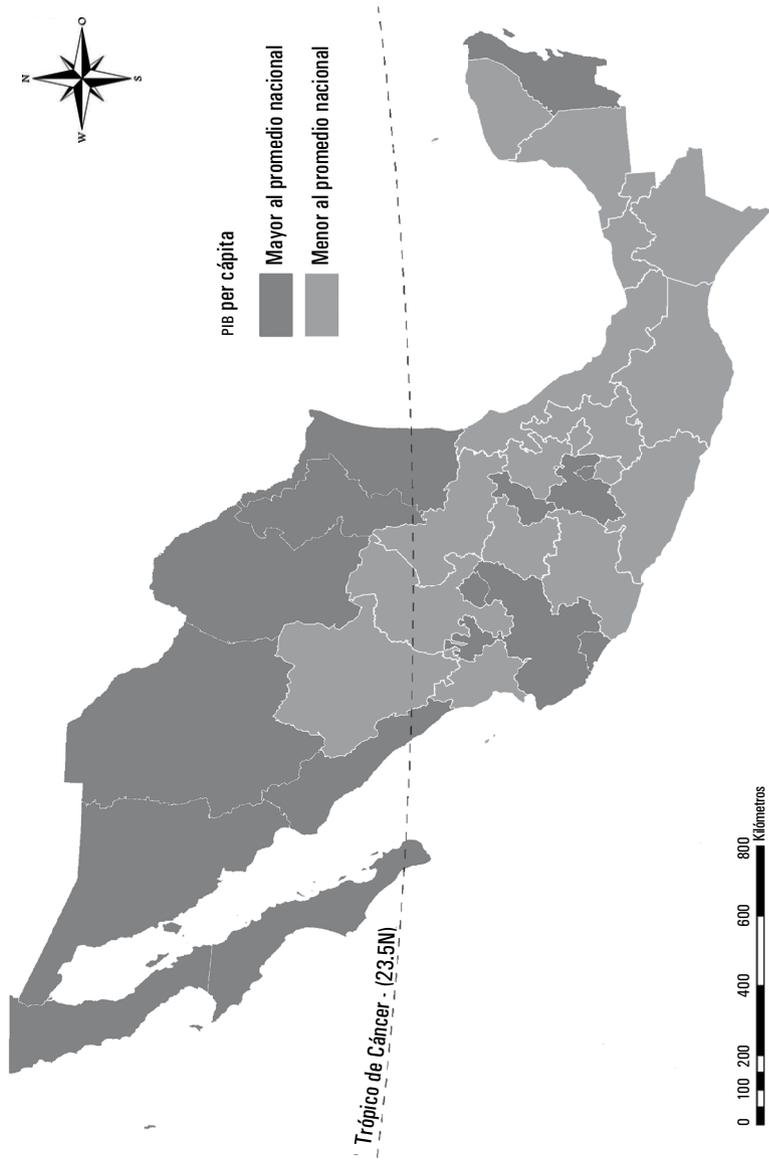
Gráfica 2.1 Relación histórica entre temperatura y PIB per cápita, 1940-2013*



* Los valores para cada estado corresponden a la temperatura promedio.
 Fuente: elaboración propia con datos del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

El mapa 2.1 describe el PIB per cápita de los estados. Estos se dividen en dos grupos: los que tienen un ingreso per cápita mayor al promedio nacional y los que su ingreso es menor al nacional. En el mapa se muestra que el país se encuentra dividido geográficamente por el trópico de Cáncer. Se observa que los estados ubicados en latitudes superiores al trópico presentan en su mayoría ingresos mayores al promedio nacional, mientras que los estados localizados en el trópico presentan por lo regular un PIB per cápita menor al promedio.

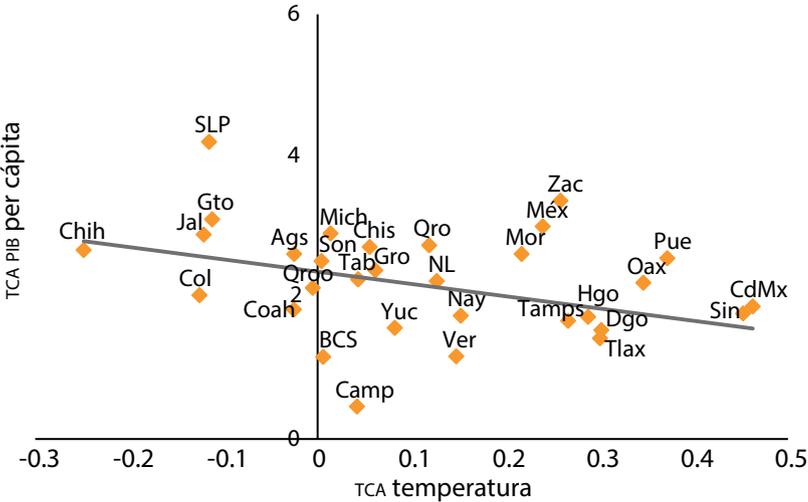
Mapa 2.1 PIB per cápita por estados



Fuente: elaboración propia con datos del Centro del Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

La gráfica 2.2 expone la relación entre las tasas de crecimiento a largo plazo de la temperatura media y del PIB per cápita para todos los estados. Dicha gráfica muestra que la relación entre estas dos variables es inversa, por lo cual, los estados que presentan tasas altas de crecimiento de la temperatura tienen también las menores tasas de crecimiento del PIB per cápita. Esto señala que un mayor aumento de la temperatura media podría acelerar la reducción del ingreso per cápita de los estados.

Gráfica 2.2 Relación entre la tasa de crecimiento de la temperatura y la tasa de crecimiento del PIB per cápita, 1940-2013*



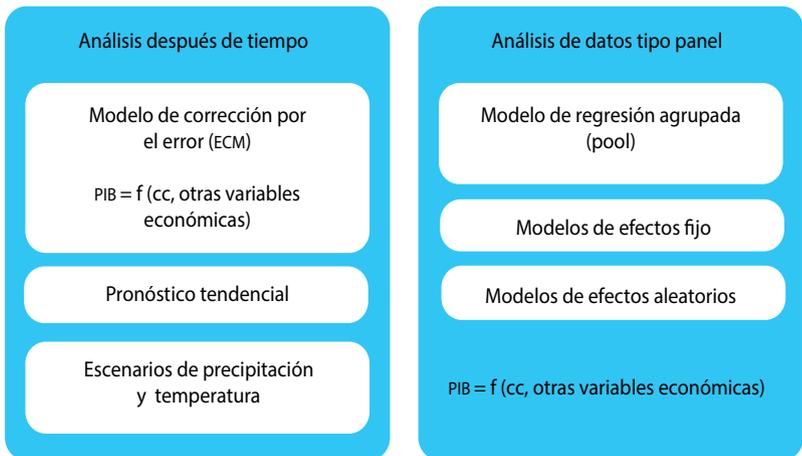
* Los valores para cada estado corresponden a la mediana de la tasa de crecimiento de la temperatura y la mediana de la tasa de crecimiento del PIB, lo anterior debido a la distribución de los datos.

Fuente: elaboración propia con datos del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

3. METODOLOGÍA

En el análisis de datos de tipo económico, social y ambiental pueden existir diferentes métodos de estimación, en función del tipo de datos empleados. En este sentido, es posible hallar distintas dimensiones sobre las cuales se desee estimar relaciones causales entre variables: individuos, tiempo y espacio, entre otros. En el análisis de datos climáticos y económicos es común abordar dos tipos de modelos: series de tiempo y modelos de panel; este último combina la dimensión individual y temporal. El siguiente diagrama ilustra la estrategia metodológica que seleccionamos para analizar los impactos de eventos meteorológicos extremos, debido al cambio climático, en el producto por habitante en las entidades de la República Mexicana.

Diagrama 3.1 Estrategia metodológica



Fuente: elaboración propia.

De manera específica, seleccionamos la metodología de series de tiempo porque nos permitirá explicar la evolución del PIB ante variaciones en la temperatura y precipitación (variables exógenas) a nivel nacional, así como predecir cuál podría ser la tendencia futura del producto nacional bajo diferentes escenarios de las variables exógenas de interés. Por otro lado, aprovechamos las características de la metodología de panel de datos para analizar el impacto estatal del PIB y las variables exógenas mencionadas con anterioridad.

De esta manera, ambas metodologías nos permitirán obtener estimaciones sobre el impacto de las variaciones en la temperatura y precipitación en el PIB nacional y estatal, y podremos sugerir políticas públicas específicas para la adaptación y mitigación ante el cambio climático. Es importante mencionar que en las dos metodologías de estimación utilizamos el PIB por habitante como la variable endógena y como variables exógenas tomamos los datos de temperatura, precipitación y otros datos económicos cambiantes.

Por último, las metodologías de panel y series de tiempo no son nuevas en el campo de la econometría, pero resulta interesante su uso en el estudio de la relación causal entre la actividad económica y el cambio climático. A continuación, se especifica la metodología para cada uno de ellos, ya que se utilizan en el capítulo 4.

MODELOS DE CORRECCIÓN DE ERROR

Los modelos de rezagos distribuidos (ADL, por sus siglas en inglés) están especificados de manera que incluyen las variables contemporáneas y rezagadas como condicionantes de la variable dependiente [Mills, 2019]:

$$y_t = \alpha_0 + \beta_0 x_t + \alpha_1 y_{t-1} + \beta_1 x_{t-1} + u_t \quad (1)$$

Donde y_t es la variable endógena y x_t es la variable exógena en el periodo t , mientras que y_{t-1} y x_{t-1} son los rezagos de ambas variables. Cabe destacar que las variables del modelo, tanto endógenas como exógenas, comparten el mismo número de rezagos. El término u_t representa el componente estocástico, el cual se asume que es una serie con distribución normal, independiente e idénticamente distribuida (iid~ $N[0; \sigma^2]$). Los supuestos del término de error se validan a través de verificar que los residuales pasen las pruebas de correcta especificación del modelo tales como: homocedasticidad, linealidad, normalidad y no autocorrelación.

Además, en la econometría moderna se debe comprobar si las series siguen tendencias estocásticas o determinísticas. Esto es, que sean series no estacionarias o integradas de orden $I(1)$ o $I(2)$. Cuando un modelo con series no estacionarias se estima con el método de mínimos cuadrados ordinarios, se obtendrán estimaciones sesgadas de los parámetros de interés.

No obstante, cuando las series de un modelo son todas del mismo orden de integración –por ejemplo, $I(1)$ –, tienen tendencias estocásticas comunes; se dice que cumplen con la propiedad de cointegración [Engel y Granger, 1987]. En este caso, la mejor especificación econométrica es el modelo de corrección por el error (ECM, por sus siglas en inglés), es decir, un modelo estacionario. A continuación, se describe el proceso de reparametrización de un modelo ADL a un modelo ECM cuando las series son no estacionarias y cointegran. Estas reparametrizaciones se llevarán a cabo con los modelos de series de tiempo del PIB, la temperatura y la precipitación que se describen en el capítulo 5.

Para reparametrizar un modelo ADL como ECM partimos de la ecuación (1). Sumando y restando $y_{t-1} - y_{t-1}$ y $\beta_0(x_{t-1} - x_{t-1})$ obtenemos la siguiente ecuación:

$$y_t - (y_{t-1} - y_{t-1}) = \alpha_0 + \beta_0 x_t + \alpha_1 y_{t-1} + \beta_1 x_{t-1} + \beta_0(x_{t-1} - x_{t-1}) + u_t \quad (2)$$

Reordenando los términos de la ecuación (2), tenemos que:

$$y_t - y_{t-1} = \alpha_0 - y_{t-1} + \alpha_1 y_{t-1} + \beta_0 x_t - \beta_0 x_{t-1} + \beta_1 x_{t-1} + \beta_0 x_{t-1} + u_t \quad (3)$$

Si $\Delta y_t = y_t - y_{t-1}$ y $\Delta x_t = x_t - x_{t-1}$, sustituimos estos valores en (3):

$$\Delta y_t = \alpha_0 - y_{t-1} + \alpha_1 y_{t-1} + \beta_0 \Delta x_t + \beta_0 x_{t-1} + \beta_1 x_{t-1} + u_t \quad (4)$$

Acomodando los términos en (4) llegamos a la siguiente ecuación:

$$\Delta y_t = \alpha_0 - [(1 - \alpha_1)y_{t-1} - (\beta_0 + \beta_1)x_{t-1}] + \beta_0 \Delta x_t + u_t \quad (5)$$

Que también puede expresarse como:

$$\Delta y_t = \beta_0 \Delta x_t - (1 - \alpha_1) \left(x_{t-1} - \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_1} - \frac{\beta_0 - \beta_1}{1 - \alpha_1} x_{t-1} \right) + u_t$$

Es decir,

$$\Delta y_t = \beta_0 \Delta x_t - (1 - \alpha_1) (y_{t-1} - \theta_0 - \theta_1 x_{t-1}) + u_t \quad (6)$$

El modelo de la ecuación (6) representa la reparametrización de un modelo ADL a un modelo ECM. El modelo ECM está conformado por dos partes: corto plazo y la corrección con respecto al largo plazo. El corto plazo se muestra a través de las diferencias de las variables Δy_t y Δx_t . La corrección por el error o mejor conocida como el vector de cointegración está expresado por $(1 - \alpha_1) (y_{t-1} - \theta_0 - \theta_1 x_{t-1})$. Es decir, el cambio en t de la variable dependiente (Δy_t) es una función lineal del cambio en t de la variable exógena (Δx_t) y una proporción del error $(1 - \alpha_1)$ en el periodo $t-1$ con respecto a la relación de equilibrio de largo plazo $y_t - \theta_0 + \theta_1 x_t$. Es importante enfatizar, que esta reparametrización solo se lleva a cabo cuando

las series de interés son del mismo orden de integración –por ejemplo I(1)– y cointegran.

Para la modelación de las series climáticas y económicas se utilizaron modelos autorregresivos con rezagos distribuidos, ya que permiten capturar todos los componentes de una serie de tiempo y de manera simultánea ofrecen la posibilidad de incorporar la teoría económica en su estructura. Otra de las ventajas de los modelos ADL es que pueden expresarse como un modelo corrector de error cuando las series de interés presentan evidencia de raíz unitaria (la serie no es estacionaria). Asimismo, si se desea realizar escenarios de simulación de política es recomendable emplear un modelo de ecuaciones simultáneas en lugar de un SVAR, debido a que el segundo es más útil para analizar la dinámica del modelo ante un *shock*.

En particular, este estudio empleó un sistema de ecuaciones simultáneas cointegrado que incluye modelos de corrección por el error para cada variable de interés, dado que de esta manera es posible realizar distintos ejercicios de simulación de políticas económicas y ambientales. De acuerdo con Enders [2003] es preferible iniciar con un sistema de modelos ADL, el cual puede ser reparametrizado como un sistema de ecuaciones simultáneas cointegrado (SES), bajo la hipótesis de no estacionariedad de las series, I(1).

La metodología de los SES permite que las series puedan ser bidireccionales, es decir, donde una variable dependa de otra y de manera simultánea sea una variable explicativa en otra ecuación [Greene, 2012]. Esta propiedad nos permite observar las interacciones que hay entre las distintas variables.

El sistema matricial surge a partir de la siguiente composición:

$$\begin{aligned}
 y_1 &= \beta_{1,2}y_2 + \beta_{1,3}y_3 + \dots + \beta_{1,N}y_N + \gamma_{1,1}x_1 + \dots + \gamma_{1,k}x_k + u_1 \\
 y_1 &= \beta_{2,1}y_1 + \beta_{2,3}y_3 + \dots + \beta_{2,N}y_N + \gamma_{2,1}x_1 + \dots + \gamma_{2,k}x_k + u_2 \\
 y_N &= \beta_{N,1}y_1 + \dots + \beta_{N,N-1}y_{N-1} + \gamma_{N,1}x_1 + \dots + \gamma_{N,k}x_k + u_2
 \end{aligned} \tag{7}$$

donde y_1, y_2, \dots, y_N son variables endógenas, x_1, x_2, \dots, x_k son variables exógenas o predeterminadas y u_1, u_2, \dots, u_N son variables aleatorias. La ecuación (7) es conocida como ecuación estructural o de comportamiento porque representa la estructura de un modelo económico [Gujarati, 2001: 641].

A partir de la ecuación estructural se puede llegar a la forma reducida, en la que las variables endógenas están en función de variables predeterminadas y del término de error. La ecuación (8) describe la forma reducida de (7):

$$BY^T + \Gamma X^T + u^T = 0 \quad (8)$$

donde $Y = (y_N)$, $X = (x_K)$, $u = (u_N)$. La ecuación (8) aún puede reducirse:

$$Y = X\Pi + v \quad (9)$$

con:

$$\Pi^T = -\beta^{-1}\Gamma, v = -\beta^{-1}u \quad (10)$$

Dónde Π es el multiplicador⁶ de impacto o de corto plazo, ya que mide el cambio en la variable endógena dado un cambio en la variable exógena. Este sistema se puede reparametrizar como un sistema cointegrado una vez que se compruebe que las series son integradas de orden uno $-I(1)-$ y cumplen con la propiedad de cointegración. El sistema de ecuaciones simultáneas utilizado en el estudio quedó representado por:

$$\Delta Z_t = \Gamma \Delta Z_{t-1} + \dots + \Pi_{k-1} \Delta Z_{t-k+1} + \alpha \beta Z_{t-1} + \mu + \varepsilon_t \quad (11)$$

⁶ El multiplicador mide la variación del cambio en una variable endógena Y , respecto de un cambio en la variable exógena X , en términos porcentuales.

Una de las ventajas de los modelos ECM es que permiten hacer inferencia de las series en el corto y largo plazos, lo anterior dado que es posible incluir variables en niveles y en diferencias en el mismo modelo.

Antes de iniciar con la estimación de las ecuaciones o modelos, deben revisarse los componentes de las series de tiempo, por ejemplo, seleccionar el número de rezagos apropiados y de componentes determinísticos. Otra cuestión importante es verificar que las series sean estacionarias, para lo cual deben emplearse pruebas de raíces unitarias como Dickey-Fuller aumentada o Phillips Perron.

Una vez realizado el proceso de caracterización de las series, se procederá a su modelación. En esta etapa, se ejecutarán las pruebas de correcta especificación, que comprenden: la prueba de normalidad, no autocorrelación, homocedasticidad y estabilidad, entre otras. También, se realizarán las pruebas dentro y fuera de la muestra para evaluar la bondad de ajuste del modelo.

MODELOS DE PANEL DE DATOS

Estos modelos econométricos siguen a una muestra de individuos de interés a través del tiempo. Es decir, combinan dos tipos de información: corte transversal (individuos en un momento determinado) y series de tiempo. El objetivo principal de los modelos de panel es capturar la heterogeneidad no observable entre los individuos como en el tiempo (efectos individuales y temporales), los cuales no pueden detectarse cuando se emplean modelos de datos de corte transversal o de series de tiempo [Mayorga y Muñoz, 2000].

Los efectos individuales hacen referencia a aquellas variables que impactan de manera diferente a cada individuo, pero que no cambien en el tiempo; ejemplo de ello son: el acceso a

la tecnología, la capacidad empresarial y calidad de los insumos, entre otros. Por su parte, los efectos temporales son los *shocks* que afectan a todos los individuos por igual, pero cambian con el tiempo, por ejemplo: un cambio en la tasa de interés de referencia del Banco Central, una depreciación del tipo de cambio, el nivel de precios, regulaciones federales e internacionales, etcétera.

La ecuación (12) presenta la especificación general del modelo de regresión con datos panel:

$$Y_{it} = \alpha_{it} + \beta X_{it} + u_{it} \quad (12)$$

Con $i = 1 \dots N$ y $t = 1 \dots T$

Donde i indica la unidad de interés o individuo, t hace referencia al tiempo, α es un vector de intercepto de N parámetros, β es el vector de K parámetros y X_{it} es la i -ésima observación al momento t para las K variables explicativas. En este caso, la muestra tiene un tamaño total de $N \times T$. El término de error (u_{it}) puede descomponerse como sigue:

$$u_{it} = u_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (13)$$

Donde u_i son los efectos individuales no observables, δ_t son los efectos temporales no observables y ε_{it} es el término de error puramente aleatorio. Se pueden presentar tres posibilidades dependiendo de los supuestos que se hagan sobre u_i :

1. Si $u_i = 0$, entonces se supone que no hay heterogeneidad no observable, ni entre los individuos ni en el tiempo, por lo que es mejor determinar el modelo con el método de estimación de mínimos cuadrados ordinarios (modelo de regresión agrupada, *pool*). Es decir, el efecto es constante.
2. Si $u_i \neq 0$, entonces se considera que hay efectos fijos entre los individuos, por lo que la heterogeneidad no

observable se presentará en la constante del modelo. Si se emplea el modelo de regresión agrupada, los estimadores obtenidos serán inconsistentes. Por tanto, es preferible utilizar el modelo de efectos fijos (EF).

3. Si $\mu_i | X_i \sim N(0, \sigma_\mu^2)$, entonces se considera u_i como una variable aleatoria no observable que varía únicamente entre los individuos, pero no en el tiempo (efectos aleatorios). Esto es, la diferencia entre los individuos es aleatoria, extraídos de una distribución con parámetros constantes. En este modelo, se asume que los errores no se correlacionan con las variables explicativas.

A continuación, se analiza más detalladamente cada una de estas especificaciones.

Modelo de efectos fijos

El supuesto más elemental y consistente sobre el comportamiento de los residuos es el de efectos fijos. El modelo de EF supone que cada individuo del panel tiene un intercepto diferente e independiente, dadas sus características propias. La forma de capturar los N interceptos es con el uso de una variable *dicotómica*. Suponiendo que α_i es un parámetro a estimar y que aquellos son constantes en el tiempo para cada individuo, el modelo EF puede estimarse mediante la inclusión de una variable dicotómica para cada individuo. Sin embargo, esta solución reduce los grados de libertad. La ecuación del modelo EF está dada por

$$Y_{it} = \alpha_i + \beta X_{it} + u_{it} \quad (14)$$

con $u_{it} = u_i + \varepsilon_{it}$

Es decir, el error u_{it} puede descomponerse en dos partes, una fija y constante para cada individuo (u_i), y una aleatoria que cumple los requisitos de MCO (ε_{it}). Cuando se utiliza el modelo de efectos fijos, se asume que hay algo entre los individuos que podría sesgar las variables predictoras o la variable dependiente. El modelo de efectos fijos remueve los efectos de las características que no cambian en el tiempo para obtener el efecto neto de las variables predictoras sobre la variable dependiente. Otro supuesto básico es que el término de error y la constante entre individuos no deben correlacionarse. Si los términos de errores se correlacionan entre individuos, entonces no es apropiado emplear el modelo de EF, ya que podrían obtenerse estimadores sesgados.

Además, se debe evaluar la necesidad de incluir efectos fijos de tiempo en la estimación de EF. Se realiza una prueba F conjunta sobre la hipótesis nula, lo cual indica que los coeficientes de todos los años son iguales a cero. Si se rechaza la hipótesis nula, entonces no hay necesidad de incluir efectos fijos de tiempo en la especificación.

Modelo de efectos entre (between) y modelo dentro de los grupos (within)

Partimos de la siguiente regresión agrupada:

$$y_{it} = x'_{it}\beta + \alpha + \varepsilon_{it} \quad (15)$$

La ecuación (15) puede reescribirse en términos de desviaciones respecto de medias grupales como sigue:

$$y_{it} - \bar{y}_i = (x_{it} - \bar{x}_i)' \beta + (\varepsilon_{it} - \bar{\varepsilon}_i) \quad (16)$$

La ecuación (16) describe un modelo de EF en el que se ha eliminado el intercepto. El estimador β es conocido como el estimador *within* o estimador de EF intragrupos. En este

modelo se explica la desviación de y_{it} respecto de \bar{y}_i en lugar de la diferencia de medias entre individuos. El estimador de EF intragrupos se refiere a la variabilidad del individuo sobre el tiempo y se expresa como sigue:

$$\hat{\beta}_{FE} = \left(\sum_i \sum_t (x_{it} - \bar{x}_i)(x_{it} - \bar{x}_i)' \right)^{-1} \sum_i \sum_t (x_{it} - \bar{x}_i)(y_{it} - \bar{y}_i) \quad (16)$$

Si se toman las medias grupales en la ecuación (15) obtenemos:

$$\bar{y}_i = \bar{x}_i' \beta + \alpha + \bar{\varepsilon}_i \quad (17)$$

La ecuación (17) describe la forma del modelo *between* o entre grupos, el cual mide la variación entre individuos.

Modelo de efectos aleatorios

Cuando el término de error está correlacionado con los regresores, el modelo de EF no es el más adecuado para realizar inferencias. En este caso es preferible emplear el modelo de efectos aleatorios (RE, por sus siglas en inglés) para capturar dicha correlación (ver prueba de Hausman en Montero [2011]). El modelo de efectos aleatorios considera que μ_i es una variable aleatoria con un valor medio μ_i y una varianza $(\mu_i) \neq 0$. La ecuación que representa los efectos aleatorios es la siguiente:

$$Y_{it} = (\alpha + \mu_i) + \beta' X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (18)$$

En esta ecuación, μ_i indica la perturbación aleatoria, lo cual significa que no se está seguro del valor exacto en el origen para cada individuo, sino que se supone que dicho valor se encontrará en torno a una media. Para fines prácticos, μ_i se

agrupará con ε_{it} , por lo cual la ecuación (18) puede expresarse como sigue:

$$Y_{it} = \alpha + \beta' X_{it} + U_{it} \quad (19)$$

$$\text{Con } U_{it} = \delta_t + \mu_i + \varepsilon_{it}$$

Donde U_{it} es el nuevo término de error compuesto, en el cual se considera δ_t como el error asociado con el tiempo, μ_i el error entre individuos y ε_{it} el efecto de ambas. Para resolver el modelo de efectos aleatorios es recomendable emplear el método de mínimos cuadrados generalizados (MCG), dado que los errores no están correlacionados con los regresores [$\mu_i | X_{it} \sim N(0, \sigma_\mu^2)$].

Consideraciones para la selección del modelo de panel

¿Cómo saber cuál estimador es el más adecuado para nuestros datos longitudinales? La selección del mejor modelo para datos panel puede expresarse en los siguientes pasos:

- 1) Se parte de un modelo OLS que no considera la existencia de heterogeneidad no observada, modelo de regresión agrupada.
- 2) Mediante una prueba F se contrasta el modelo de regresión agrupada con un modelo donde hay heterogeneidad no observada en los individuos y en el tiempo. Con base en esta prueba, si no es posible rechazar la hipótesis nula, entonces se estimará un modelo de efectos fijos.
- 3) Por medio del multiplicador de Lagrange de Breush-Pagan (LM), se realiza la prueba para ayudarnos a decidir entre un modelo RE y un modelo de regresión agrupada. Breush y Pagan [1980] formularon una prueba del multiplicador de Lagrange para el modelo

de RE, el cual se basa en los residuales del OLS. La hipótesis nula de la prueba LM es que la varianza mediante los individuos es cero ($\text{var}(u) = 0$).

$$H_0: \sigma_u^2 = \sigma_\lambda^2 = 0 \text{ o como } \text{Corr}[U_{it}, U_{is}] = 0,$$

$$H_1: \sigma_u^2 \neq 0$$

Esto es, no existe diferencia significativa a través de los individuos. La prueba estadística para esta hipótesis es:

$$LM = \frac{nT}{2(T-1)} \left[\frac{\sum_{i=1}^n [\sum_{t=1}^T e_{it}]^2}{\sum_{i=1}^n [\sum_{t=1}^T e_{it}^2]} - 1 \right]^2 = \frac{nT}{2(T-1)} \left[\frac{\sum_{i=1}^n [T\bar{e}_i]^2}{\sum_{i=1}^n [\sum_{t=1}^T e_{it}^2]} - 1 \right]^2 \quad (20)$$

Donde, bajo la hipótesis nula, LM tiene una distribución de chi-cuadrada con un grado de libertad.

- 4) Una vez que se ha comprobado que los modelos EF y RE son preferibles al modelo de regresión agrupada, se aplica la prueba de Hausman para verificar cuál es el mejor modelo, si el de efectos fijos o el de efectos aleatorios.

El estadístico de Hausman [1978] prueba si los errores individuales (u_i) están correlacionados con los regresores, es decir, el estadístico prueba la ortogonalidad de los efectos aleatorios y los regresores. La hipótesis nula del estadístico es que ellos no están correlacionados, por tanto, el estimador de OLS del modelo de EF y el MCG del modelo de efectos aleatorios son consistentes, pero OLS es ineficiente, mientras que la hipótesis alternativa indica que OLS es consistente, pero MCG no lo es. Esto es, bajo la hipótesis nula ambos estimadores no son diferentes de forma sistemática [Greene, 2012].

El estadístico de Hausman prueba que x_{it} y α_i no están correlacionados en la hipótesis nula. Por un lado, tenemos un estimador ($\hat{\beta}_{FE}$) que es consistente bajo la hipótesis nula y

la alternativa. Por el otro lado, tenemos otro estimador ($\hat{\beta}_{RE}$) que es consistente y eficiente únicamente bajo la hipótesis nula. Es decir, si se encuentra una diferencia importante en ambos indicadores, es poco probable que la hipótesis nula se sostenga. Por tanto,

$$H_0 \text{ es el modelo RE: } y_{it} = \beta_0 + x'_{it}\beta + u_{it}$$

$$H_A \text{ es el modelo EF: } y_{it} = \alpha_i + x'_{it}\beta + u_{it}$$

El estadístico de Hausman se basa en la matriz de varianzas y covarianzas de un vector de diferencias $[b - \hat{\beta}]$:

$$Var[b - \hat{\beta}] = Var[b] + Var[\hat{\beta}] - Cov[b, \hat{\beta}] - cov[b, \hat{\beta}] \quad (21)$$

La ecuación anterior indica que la covariación de la diferencia de un estimador eficiente con respecto a un estimador ineficiente es cero, lo cual implica que:

$$Cov[(b - \hat{\beta}), \hat{\beta}] = Cov[b, \hat{\beta}] - Var[\hat{\beta}] = 0$$

También puede reescribirse como:

$$Cov[(b - \hat{\beta})] = Var[\hat{\beta}] \quad (22)$$

Insertamos la ecuación (22) en (21) y obtenemos la matriz de covarianza necesaria para realizar la prueba:

$$Var[(b - \hat{\beta})] = Var[b] - Var[\hat{\beta}] = \Psi \quad (23)$$

Además, se emplea la prueba de chi-cuadrada que se basa en el criterio de Wald:

$$W = x^2[K - 1] = [b - \hat{\beta}]' \Phi^{-1}[b - \hat{\beta}] \quad (24)$$

Para $\hat{\Psi}$ se utilizan las matrices de varianza y covarianza de la pendiente del estimador del modelo de EF y la matriz de varianzas y covarianzas del modelo RE, sin incluir la constante. Bajo la hipótesis nula, W tiene una distribución chi-cuadrada limitada con $K-1$ grados de libertad.

Finalmente, estimar un modelo de panel supone la existencia de características no observables constantes en el tiempo que podrían afectar la precisión de las estimaciones de los impactos. Por ello se aprovecha la disponibilidad de una base de datos de panel que pueda contemplar este tipo de heterogeneidad.

4. EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN NIVELES ESTATAL Y NACIONAL

En este capítulo se presentan los resultados del impacto de las variaciones en la precipitación y en la temperatura sobre el crecimiento del PIB per cápita en los ámbitos estatal y nacional. Para el análisis econométrico se llevaron dos tipos de estimaciones econométricas según el tipo de datos utilizados (para más información sobre las fuentes utilizadas ver el Anexo A.2). En primer lugar, se estimaron modelos de corrección por el error (ECM) que se resuelven de manera simultánea y que permiten realizar diferentes escenarios. De manera específica, se busca aproximar qué pasaría con el crecimiento económico, hasta el año 2100, bajo diferentes patrones de temperatura y precipitación. De igual forma, se realiza un análisis con base en la metodología de datos panel. Se estiman modelos de efectos fijos y aleatorios que permiten determinar las diferentes respuestas del PIB de los estados de la República Mexicana ante variaciones en los patrones de precipitación y temperatura. En este último análisis, se corrobora la robustez estadística de las estimaciones de series de tiempo. Asimismo, se muestra que las estimaciones de la elasticidad-precipitación del PIB y la de su temperatura son heterogéneas en los estados de la República. Los resultados con ambas metodologías sugieren que el cambio en las variables climáticas podría afectar de maneras negativa y estadística el crecimiento del PIB per cápita a niveles estatal y nacional.

La estimación con base en modelos de corrección por el error (ECM) se divide en dos secciones: análisis de impactos y simulación de escenarios. La primera sección presenta la estimación de la sensibilidad del producto per cápita ante cambios en las variables climáticas. Lo anterior, mediante la estimación econométrica de las elasticidades temperatura y precipitación del PIB per cápita para el periodo 1940-2013.

El segundo apartado presenta un análisis de simulación de escenarios del PIB per cápita, según ocho contextos de precipitación y de temperatura para el año 2100. En este caso, dicha información se obtiene a partir de los RCP [Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2014b], los cuales son modelos que contemplan diferentes patrones de crecimiento económico, poblacional y tecnológico, así como distintas situaciones de adaptación al cambio climático. Este tipo de simulaciones puede realizarse debido a que se cuenta con información anticipada de los contextos que podrían presentarse en el largo plazo. Asimismo, los situaciones se subdividen en dos tipos: situaciones donde las emisiones son bajas y ámbitos con emisiones altas.

Los escenarios de emisiones bajas suponen un aumento de temperatura global de alrededor de 2 °C, en un contexto de gran cooperación internacional para reducir emisiones de gases de efecto invernadero. Por otra parte, los escenarios de emisiones altas contemplan un aumento de la temperatura global de aproximadamente 4.5 °C, donde, en general, los combustibles fósiles predominan como energéticos principales.

Impacto del cambio en la temperatura y en la precipitación sobre el crecimiento del PIB per cápita

Esta sección evalúa el impacto que el cambio en las variables climáticas podría generar sobre el crecimiento del PIB per

cápita a niveles estatal y nacional. El análisis se presenta en dos apartados. En el primero se presentan estimaciones empíricas de las elasticidades para cada uno de los estados, mientras que en el segundo se describen en términos agregados para todo el país. Las variables de clima que se analizan en este estudio son temperatura media y precipitación. A grandes rasgos, los cambios en la precipitación y en la temperatura mostraron impactos negativos y diferenciados sobre el crecimiento del PIB per cápita en México.

Impactos a nivel estatal

Los resultados de los modelos econométricos del efecto de la variación de la temperatura media y de la precipitación, en el crecimiento del PIB per cápita, para las 32 entidades federativas se presentan en el cuadro 4.1. En general se puede observar que un aumento de 1 °C en la temperatura tendría un efecto negativo y diferenciado para cada estado de la República (mapa 4.1).

El mapa 4.1 muestra los impactos en el PIB per cápita por el aumento de 1 °C en la temperatura y el incremento de la precipitación anual de 1 mm. En ambos mapas los colores más fuertes denotan un mayor impacto en el PIB per cápita y los colores más claros corresponden a un impacto menor. Notamos que el efecto de la temperatura en el PIB es diferenciado en el mapa 4.1. De manera específica, las entidades que se ubican en la zona norte y centro del país son las más afectadas. De acuerdo con nuestras estimaciones, no podemos concluir que las entidades que presentan mayor temperatura son las que tienen mayor impacto por el aumento de la temperatura. En el caso de la incidencia del aumento de la precipitación anual en el PIB per cápita, observamos que las entidades del norte presentan un mayor efecto, en comparación con las entidades del sur (debajo del trópico de Cáncer).

Cuadro 4.1 Impacto de las variaciones en la temperatura y la precipitación estatales en el crecimiento del PIB per cápita

Estado	Impacto en el PIB per cápita ante el aumento de 1°C en la temperatura promedio	Impacto en el PIB per cápita ante el aumento de 1 mm en la precipitación anual
Aguascalientes	-5.52	-0.05
Baja California	-7.52	-0.02
Baja California Sur	-3.00	-0.15
Campeche	-1.96	-0.01
Coahuila	-4.29	-0.27
Colima	-1.33	-0.01
Chiapas	-3.60	-0.03
Chihuahua	-0.74	-0.15
Ciudad de México	-1.89	-0.02
Durango	-1.06	-0.07
Estado de México	-2.48	-0.04
Guanajuato	-3.69	0.00
Guerrero	-5.14	-0.06
Hidalgo	-6.84	-0.05
Jalisco	-2.07	-0.01
Michoacán	-3.69	-0.01
Morelos	-5.30	-0.02
Nayarit	-1.52	-0.05
Nuevo León	-1.72	0.00
Oaxaca	-1.95	-0.09
Puebla	-0.37	-0.05

Cuadro 4.1 (continuación)

Estado	Impacto en el PIB per cápita ante el aumento de 1 °C en la temperatura promedio	Impacto en el PIB per cápita ante el aumento de 1 mm en la precipitación anual
Querétaro	-4.81	-0.01
Quintana Roo	-0.70	-0.01
San Luis Potosí	-2.60	-0.15
Sinaloa	-0.33	-0.01
Sonora	-3.60	-0.23
Tabasco	-2.83	-0.04
Tamaulipas	-2.28	-0.06
Tlaxcala	-2.01	-0.03
Veracruz	-1.38	-0.03
Yucatán	-1.94	-0.02
Zacatecas	-1.92	-0.04

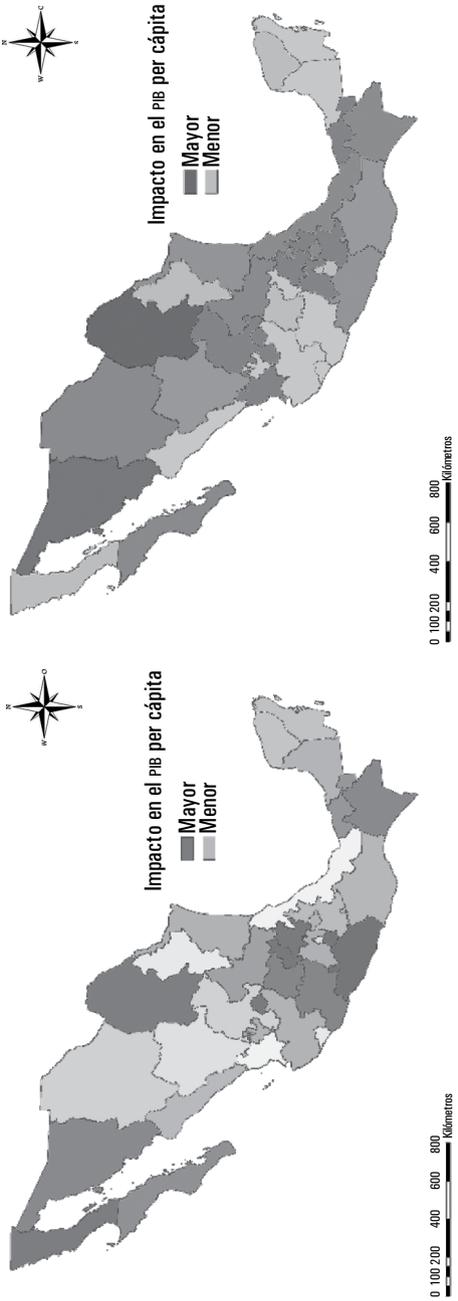
Fuente: estimación propia con datos de Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

En conclusión, en la gráfica 4.1 es posible apreciar que hay heterogeneidad en los impactos. El estado más vulnerable es Baja California y el que presenta menos afectaciones en el crecimiento de su PIB per cápita ante cambios en la temperatura es Sinaloa.

En relación con el impacto del cambio en la precipitación sobre el crecimiento del PIB per cápita en las entidades federativas, el aumento de 1 mm puede generar reducciones del crecimiento del PIB per cápita de hasta -0.27 %. Un incremento de 25 mm tendría un efecto de hasta -6.75 %. Mientras que, un incremento en la precipitación de 50 mm reduciría el PIB per cápita hasta -13.5 por ciento.

Mapa 4.1. Impacto en el PIB per cápita por variaciones en la temperatura y la precipitación

Impacto por el incremento en la temperatura de 1 °C Impacto por el aumento de la precipitación anual de 1 mm



Fuente: estimación propia con datos del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNIAM.

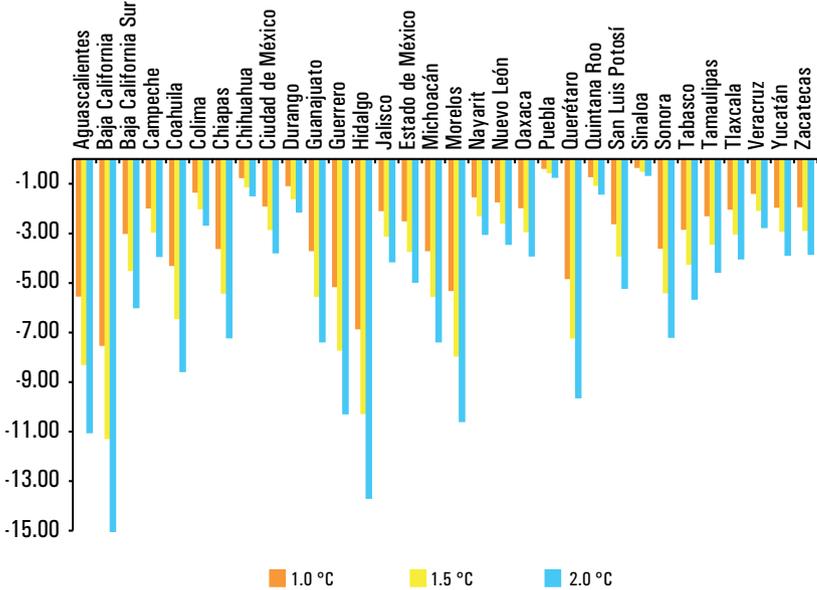
Entre los estados, el mayor impacto adverso podría observarse en Baja California (-7.52%). Hidalgo quizá también se afecte de manera importante por la variación en la temperatura (-6.84%).

De forma contraria, las entidades federativas donde los efectos pueden ser menos adversos son Sinaloa y Puebla, en los cuales el aumento de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ tendría como consecuencia una caída del PIB per cápita de -0.33% y -0.37% en cada caso. Es importante señalar que en todos los estados el cambio en la temperatura media afecta de manera negativa al PIB per cápita (cuadro 4.1).

En términos de los efectos de los eventos extremos de precipitación, en general se observó que el incremento de 1 mm anual tiene un impacto negativo sobre el crecimiento del PIB per cápita. El cambio en esta variable climática afecta en mayor medida a los estados de Coahuila y Sonora (-0.27% y -0.23% , respectivamente). Mientras que, en los estados de Guanajuato y Nuevo León el impacto del aumento de 1 mm de precipitación anual es nulo.

Los efectos que el cambio en la temperatura tendría sobre el PIB per cápita de cada estado sugieren que un aumento de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la temperatura promedio generaría una reducción del PIB per cápita estatal de entre -0.3% y -7.52% . Un incremento de $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ disminuiría al PIB per cápita entre -0.4% y -11.28% . Si la temperatura aumentara $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, el producto per cápita estatal podría reducirse entre -0.6% y -15.03 por ciento.

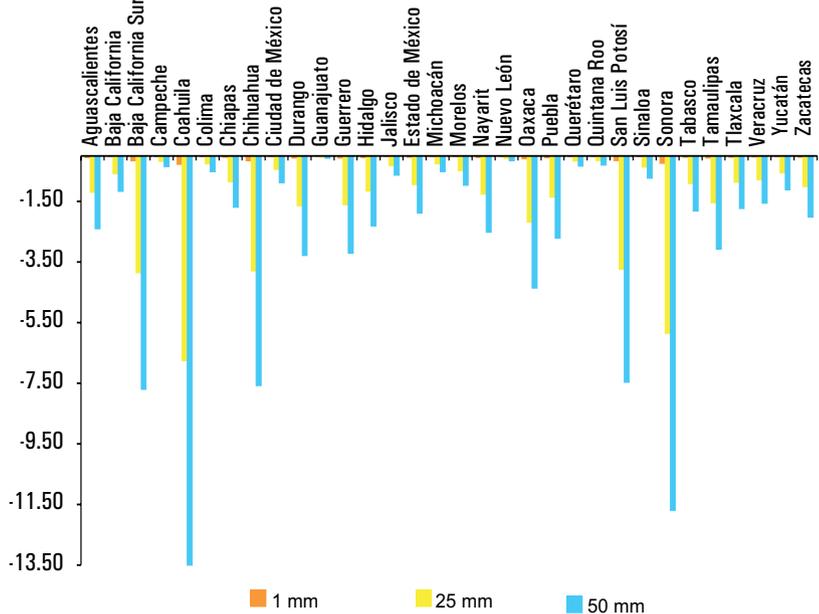
Gráfica 4.1 Impacto del cambio en la temperatura de 1 °C, 1.5 °C y 2 °C sobre la tasa de crecimiento del PIB per cápita estatal



Fuente: elaboración propia con datos del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

El cambio en esta variable afectaría con mayor magnitud a los estados de Coahuila y Sonora. Contrariamente, los estados de Guanajuato y Nuevo León podrían sufrir impactos muy pequeños en su PIB per cápita. Estos datos indican también que existe heterogeneidad en el efecto del nivel de precipitación en los diferentes estados, es decir, las entidades federativas tendrían efectos económicos diferenciados (gráfica 4.2).

Gráfica 4.2 Impacto del cambio en la precipitación de 1 mm, 25 mm y 50 mm sobre el PIB per cápita estatal



Fuente: elaboración propia con datos del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

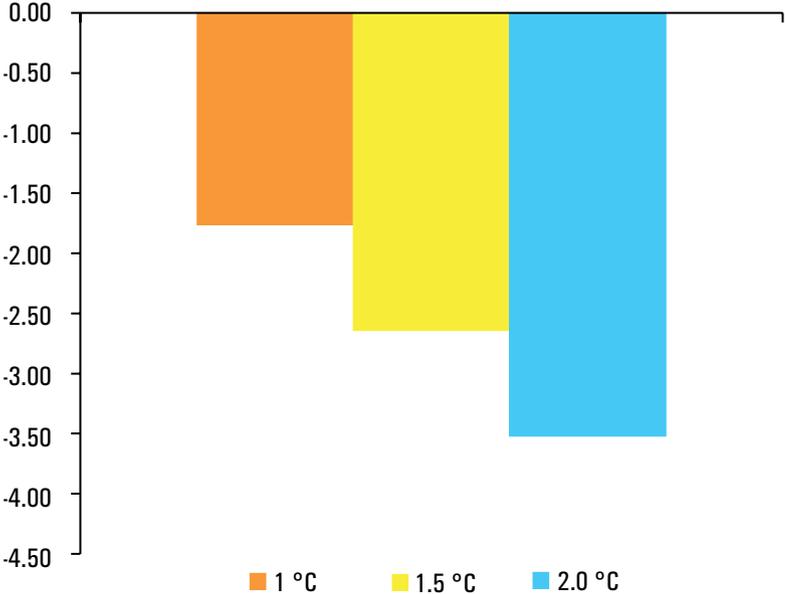
Impacto a nivel nacional

A continuación, se analizan los impactos del cambio en la temperatura media y en la precipitación sobre el PIB per cápita de México a nivel de todo el país. En general, el cambio de estas dos variables climáticas podría tener importantes efectos negativos sobre el PIB per cápita. De manera particular se analiza el efecto que tendría el aumento de 1 °C, 1.5 °C y 2.0 °C.

Un incremento de la temperatura promedio de 1 °C impactaría de manera negativa el crecimiento del PIB per cápita en -1.76 %. Con un aumento de la temperatura de 1.5 °C, el

crecimiento se alteraría -2.64% . Si la temperatura aumentara $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, el PIB nacional reduciría su crecimiento -3.52% por ciento (gráfica 4.3).

Gráfica 4.3 Impacto del cambio en la temperatura en $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ sobre la tasa de crecimiento del PIB per cápita nacional



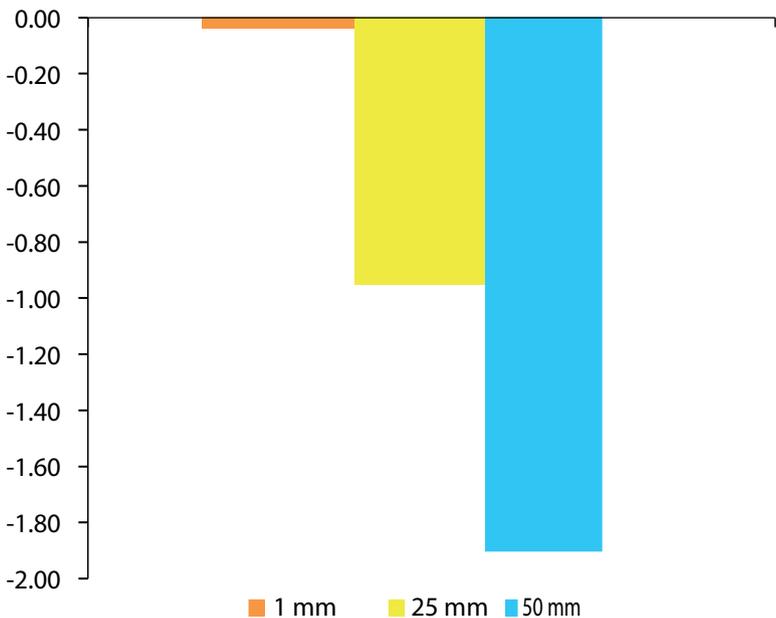
Fuente: estimación propia con datos del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

Los efectos del cambio en la precipitación en México fueron evaluados para tres distintos niveles de cambio en dicha variable: 1 mm, 25 mm y 50 mm. En general, los datos a nivel nacional señalan que las alteraciones en las variables climáticas reducirían de manera importante el crecimiento económico del país.

El aumento de 1 mm en los niveles de precipitación nacional tiene un efecto muy pequeño sobre el crecimiento del PIB

per cápita (-0.04 %). Sin embargo, un aumento de la precipitación de 25 mm generaría una reducción de 0.95 % del crecimiento per cápita. Mientras que un aumento en la precipitación en 50 mm produciría una caída de 1.90 % del PIB per cápita (gráfica 4.4).

Gráfica 4.4 Impacto del cambio en la precipitación en 1 mm, 25 mm y 50 mm sobre el PIB per cápita nacional



Fuente: estimación propia con datos del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

Escenarios de crecimiento del PIB per cápita de acuerdo con diferentes contextos de precipitación y temperatura, 2014 a 2100

En este apartado se presentan los resultados de los distintos escenarios de crecimiento económico para el año 2100. Dichos resultados son producto de las diferencias de las medias

del PIB per cápita durante el periodo histórico (1940-2013) y durante el periodo simulado (2014-2100), donde esta diferencia es atribuible al cambio en las variables climáticas.

Los escenarios se basan en las proyecciones de precipitación y de temperatura de los modelos RCP⁷ DEL IPCC hasta el año 2100. Dichas proyecciones de cambio climático contemplan ocho diferentes contextos, donde cuatro de ellos son de emisiones bajas de CO₂, mientras que los otros cuatro se refieren a emisiones altas.

De acuerdo con nuestros escenarios de crecimiento económico, los cambios en las variables climáticas que se proyectan para finales del presente siglo tendrían como consecuencia una caída en el PIB per cápita de todos los estados de la República. Esta reducción en el PIB per cápita surge tanto en los escenarios de bajas como en los de altas emisiones.

Escenarios a nivel estatal

En este apartado se estimaron escenarios de crecimiento del PIB per cápita para cada una de las proyecciones de temperatura y de precipitación de los RCP al año 2100. A partir de nuestros escenarios, se calculó el cambio en la tasa media de crecimiento del PIB per cápita, en el periodo 2014-2100, en relación con el histórico (1940-2013).

La variación en la temperatura que se proyecta en los ocho modelos de referencia tendría como consecuencia una reducción de la tasa media de crecimiento del PIB per cápita de todos los estados. Otro hallazgo importante es que en 30 de los 32 estados analizados, los escenarios con emisiones de CO₂

⁷ Los modelos RCP seleccionados son GFDL-ESM2M, HadGEM2-AO, IPSL-CM5A-LR y MPI-ESM-MR. Estos modelos consideran diferentes condiciones socioeconómicas y componentes del sistema climático, así como medidas de política para reducir las emisiones.

altas tendrían como consecuencia mayores caídas del crecimiento económico, en comparación con los contextos de emisiones bajas (cuadro 4.2). Este resultado sugiere que las políticas de reducción en las emisiones de CO₂ a escala mundial podrían beneficiar también el crecimiento del producto per cápita de los estados.

Entre las entidades analizadas, Baja California Sur es el estado que presenta la mayor reducción en su PIB per cápita. Esta caída se ubica en 5.63 y 5.68 % en contextos de emisiones bajas y en 5.93 y 6.15 % en situaciones de emisiones altas. Otro estado que puede afectarse de manera importante es Zacatecas, el cual muestra una reducción de su crecimiento de 3.07 y 3.08 % con emisiones bajas, y de 3.13 a 3.16 % con emisiones altas.

Por otro lado, Baja California y Durango son los estados en los que las reducciones del PIB per cápita son menores. El primero muestra una disminución de su crecimiento per cápita de entre 0.33 y 0.34 % en emisiones bajas y de 0.50 y 0.65 % en altas. Mientras que el último de estos estados podría tener reducciones de 0.61 a 0.62 % en situaciones de emisiones bajas y de 0.64 y 0.67 % en contextos de emisiones altas.

Por otra parte, los escenarios de crecimiento, basados en las proyecciones de cambios en la precipitación, sugieren que el crecimiento promedio del PIB per cápita de todos los estados disminuiría hacia el año 2100, producto del cambio en la precipitación durante este siglo (cuadro 4.3).

Cuadro 4.2 Escenarios de impacto en la tasa media de crecimiento del PIB per cápita de acuerdo con diferentes proyecciones de temperatura por estados

Estado	Emisiones bajas				Emisiones altas			
	GFDL-ESM2M	HadGEM2-AO	IPSL-CM5A-LR	MPI-ESM-MR	GFDL-ESM2M	HadGEM2-AO	IPSL-CM5A-LR	MPI-ESM-MR
Aguascalientes	-2.22	-2.22	-2.11	-2.13	-1.59	-1.41	-1.19	-1.28
Baja California	-0.34	-0.33	-0.34	-0.34	-0.50	-0.61	-0.65	-0.51
Baja California Sur	-5.68	-5.68	-5.65	-5.63	-5.95	-6.04	-6.15	-5.93
Campeche	-2.92	-2.92	-2.93	-2.92	-2.96	-3.00	-3.01	-3.01
Ciudad de México	-1.44	-1.44	-1.44	-1.44	-1.48	-1.49	-1.49	-1.50
Chiapas	-2.00	-2.03	-2.03	-2.01	-2.09	-2.16	-2.16	-2.16
Chihuahua	-1.65	-1.66	-1.65	-1.65	-1.68	-1.69	-1.70	-1.69
Coahuila	-2.07	-2.10	-2.08	-2.08	-2.15	-2.20	-2.22	-2.19
Colima	-1.56	-1.59	-1.58	-1.57	-1.67	-1.68	-1.70	-1.69
Durango	-0.61	-0.62	-0.62	-0.62	-0.64	-0.66	-0.67	-0.66
Estado de México	-2.87	-2.89	-2.89	-2.88	-2.95	-2.98	-2.99	-2.99
Guanajuato	-2.63	-2.63	-2.64	-2.64	-2.74	-2.79	-2.84	-2.79
Guerrero	-2.54	-2.55	-2.56	-2.55	-2.67	-2.73	-2.76	-2.75
Hidalgo	-2.64	-2.66	-2.68	-2.65	-2.81	-2.93	-2.95	-2.95
Jalisco	-2.67	-2.67	-2.68	-2.67	-3.07	-3.18	-3.21	-3.20

Estado	Emisiones bajas				Emisiones altas			
	GFDL-ESM2M	HadGEM2-AO	IPSL-CM5A-LR	MPI-ESM-MR	GFDL-ESM2M	HadGEM2-AO	IPSL-CM5A-LR	MPI-ESM-MR
Morelos	-1.66	-1.73	-1.71	-1.67	-1.86	-1.93	-1.94	-1.94
Nayarit	-1.97	-1.97	-1.97	-1.97	-1.49	-1.56	-1.58	-1.57
Nuevo León	-2.49	-2.51	-2.51	-2.50	-2.55	-2.58	-2.59	-2.57
Oaxaca	-2.89	-2.90	-2.90	-2.89	-2.94	-2.96	-2.96	-2.95
Puebla	-2.23	-2.23	-2.23	-2.23	-2.24	-2.24	-2.24	-2.24
Querétaro	-2.52	-2.52	-2.52	-2.52	-2.54	-2.54	-2.55	-2.54
Quintana Roo	-2.00	-2.01	-2.02	-2.01	-2.08	-2.11	-2.14	-2.12
San Luis Potosí	-1.99	-2.01	-2.01	-1.99	-2.08	-2.11	-2.13	-2.12
Sinaloa	-1.62	-1.62	-1.62	-1.61	-1.63	-1.65	-1.66	-1.65
Sonora	-2.53	-2.55	-2.56	-2.53	-2.67	-2.71	-2.75	-2.69
Tabasco	-2.46	-2.48	-2.48	-2.47	-2.53	-2.59	-2.59	-2.59
Tamaulipas	-1.16	-1.23	-1.20	-1.17	-1.36	-1.45	-1.47	-1.41
Tlaxcala	-1.95	-2.00	-1.98	-1.95	-2.04	-2.10	-2.09	-2.09
Veracruz	-1.11	-1.12	-1.12	-1.11	-1.15	-1.17	-1.18	-1.17
Yucatán	-1.50	-1.50	-1.51	-1.50	-1.54	-1.55	-1.56	-1.56
Zacatecas	-3.07	-3.08	-3.08	-3.08	-3.13	-3.15	-3.18	-3.16

Fuente: elaboración propia con datos del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

Cuadro 4.3 Escenarios de impacto en la tasa media de crecimiento del PIB per cápita de acuerdo con diferentes proyecciones de precipitación por estados

Estado	Emisiones bajas				Emisiones altas			
	GFDL-ESM2M	HadGEM2-AO	IPSL-CM5A-LR	MPHESM-MR	GFDL-ESM2M	HadGEM2-AO	IPSL-CM5A-LR	MPI-ESM-MR
Aguascalientes	-2.30	-2.30	-2.26	-2.24	-2.20	-2.16	-2.11	-1.80
Baja California	-0.32	-0.32	-0.31	-0.31	-0.28	-0.31	-0.29	-0.30
Baja California Sur	-5.62	-5.54	-5.60	-5.56	-5.62	-5.60	-5.67	-5.52
Campeche	-3.11	-3.06	-3.07	-3.08	-3.11	-3.01	-2.99	-2.85
Ciudad de México	-0.74	-0.77	-0.71	-0.74	-0.74	-0.76	-0.61	-0.31
Chiapas	-2.05	-1.95	-1.98	-2.03	-2.06	-1.80	-1.55	-0.36
Chihuahua	-2.25	-2.17	-2.10	-2.20	-2.15	-2.14	-1.77	-1.67
Coahuila	-2.06	-2.08	-2.10	-2.06	-2.07	-2.11	-1.87	-1.80
Colima	-1.56	-1.58	-1.59	-1.56	-1.62	-1.60	-1.53	-1.40
Durango	-1.66	-1.67	-1.65	-1.65	-1.68	-1.63	-1.41	-1.18
Estado de México	-2.74	-2.78	-2.67	-2.72	-2.74	-2.75	-2.52	-1.96
Guanajuato	-2.66	-2.66	-2.66	-2.66	-2.66	-2.66	-2.65	-2.65
Guerrero	-2.22	-2.24	-2.11	-2.25	-2.25	-2.16	-1.89	-1.17
Hidalgo	-2.46	-2.66	-2.33	-2.57	-2.56	-2.59	-2.01	-1.52
Jalisco	-2.66	-2.65	-2.64	-2.64	-2.82	-2.85	-2.27	-1.78

Estado	Emisiones bajas				Emisiones altas			
	GFDL-ESM2M	HadGEM2-AO	IPSL-CM5A-LR	MPHESM-MR	GFDL-ESM2M	HadGEM2-AO	IPSL-CM5A-LR	MPI-ESM-MR
Morelos	-1.96	-1.99	-1.93	-1.96	-1.96	-1.97	-1.90	-1.71
Nayarit	-1.80	-1.79	-1.72	-1.74	-1.59	-1.60	-1.53	-1.35
Nuevo León	-2.49	-2.48	-2.48	-2.48	-2.48	-2.48	-2.48	-2.47
Oaxaca	-2.76	-2.84	-2.64	-2.89	-2.77	-2.64	-2.24	-0.57
Puebla	-2.93	-2.99	-2.85	-2.95	-2.96	-2.96	-2.60	-2.02
Querétaro	-2.53	-2.53	-2.52	-2.53	-2.53	-2.50	-2.46	-2.37
Quintana Roo	-2.35	-2.37	-2.35	-2.35	-2.37	-2.36	-2.35	-2.32
San Luis Potosí	-2.94	-3.00	-2.85	-2.82	-2.91	-3.02	-2.55	-1.71
Sinaloa	-1.69	-1.68	-1.63	-1.64	-1.64	-1.66	-1.54	-1.49
Sonora	-2.66	-2.55	-2.27	-2.64	-2.43	-2.33	-1.80	-2.16
Tabasco	-2.54	-2.41	-2.35	-2.51	-2.59	-2.25	-1.84	-0.31
Tamaulipas	-1.33	-1.33	-1.30	-1.29	-1.27	-1.32	-1.20	-0.93
Tlaxcala	-2.24	-2.27	-2.19	-2.25	-2.23	-2.26	-2.02	-1.76
Veracruz	-1.56	-1.59	-1.47	-1.59	-1.56	-1.53	-1.17	-0.43
Yucatán	-1.51	-1.48	-1.42	-1.46	-1.51	-1.39	-1.30	-1.03
Zacatecas	-3.07	-3.06	-3.04	-3.05	-2.67	-2.64	-2.56	-2.43

Fuente: elaboración propia con datos del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

Baja California Sur es nuevamente el estado más afectado por los cambios en la precipitación. En dicha entidad, la tasa de crecimiento del PIB per cápita se reduciría entre -5.54 y -5.62 % en el contexto de emisiones bajas y entre -5.52 y -5.67 % en emisiones altas. Campeche podría tener también fuertes decrementos en su tasa media de crecimiento del PIB per cápita; la caída en este estado podría ser de -3.06 y -3.11 % en el ámbito de emisiones bajas y entre -2.85 y -3.11 % cuando las emisiones son altas.

Por el contrario, los estados menos afectados por los cambios en los patrones de lluvia son Baja California y Ciudad de México. En estos dos estados, las reducciones en el crecimiento per cápita van de -0.28 a -0.32 % y de -0.31 a -0.74 %, respectivamente.

Aunque los impactos sean bajos en proporción al crecimiento del PIB per cápita, su nivel también dependerá del tamaño de la economía. En el caso de los escenarios que relacionan el cambio en la precipitación y el crecimiento económico, las diferencias entre emisiones bajas y altas parecen ser pequeñas; sin embargo, este resultado debe estudiarse de manera más desagregada para comprender en mayor medida este fenómeno.

Escenarios a nivel nacional

La diferencia en el crecimiento promedio del PIB per cápita a escala nacional, en el periodo 2014-2100 en relación con el periodo observado (1940-2013), indica que el crecimiento del producto per cápita podría reducirse como producto del cambio en la temperatura durante el siglo XXI. El efecto sería mayor en contextos de altas emisiones de CO_2 . Dicha reducción podría ser de -1.96 y -1.97 % en escenarios de emisiones bajas, y de entre -2.01 y -2.03 % en situaciones de emisiones altas (cuadro 4.4).

Los escenarios de crecimiento económico nacional se llevaron a cabo de igual manera para los ocho escenarios de cambio en la precipitación que plantean los RCP. Los resultados señalan que el crecimiento económico promedio a nivel nacional podría reducirse como respuesta al cambio en la precipitación del país.

Cabe mencionar que dicho cambio en la precipitación podría generar disminuciones en el PIB per cápita que van de -1.59 a -1.66 % en situaciones de emisiones bajas, y de -1.03 a -1.64 % en emisiones altas (cuadro 4.5).

ESTIMACIONES CON BASE EN MODELOS DE PANEL

La robustez estadística de los resultados obtenidos mediante la metodología de series de tiempo se corrobora por medio de la estimación de modelos de panel. En estos modelos, a diferencia de los de series de tiempo, es posible tomar en cuenta la heterogeneidad entre individuos y la dinámica de los datos (rezagos). En el caso de este estudio, es necesario controlar por la heterogeneidad (efectos fijos para cada estado de la República) individual, dado que las unidades de estudio están representadas por los diferentes estados.

Para llevar a cabo el análisis del impacto del cambio en la temperatura media sobre el PIB per cápita mediante datos panel se proponen cuatro modelos, los cuales se diferencian por los supuestos que hay en cada especificación. Esto es, en términos de los elementos específicos de los estados y de la composición del término de error (cuadro 4.6).

El primero de ellos es un modelo con datos agrupados (*pool*), el que se estima mediante mínimos cuadrados ordinarios (MCO). En este tipo de modelos se asume que no existe heterogeneidad entre los estados de la República Mexicana. No obstante, si la heterogeneidad individual es significativa, este tipo de modelo presentará un sesgo por omisión de variables.

Cuadro 4.4 Escenarios de impacto en la tasa media de crecimiento del PIB per cápita nacional de acuerdo con proyecciones de temperatura

		Emisiones bajas				Emisiones altas			
GFDL-ESM2M HadGEM2-AO IPSL-CM5A-LR MPI-ESM-MR GFDL-ESM2M HadGEM2-AO IPSL-CM5A-LR MPI-ESM-MR									
Nacional	-1.96	-1.97	-1.97	-1.97	-1.97	-2.01	-2.02	-2.04	-2.03

Fuente: elaboración propia con datos del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

Cuadro 4.5 Escenarios de impacto en la tasa media de crecimiento del PIB per cápita nacional de acuerdo con proyecciones de precipitación

		Emisiones bajas				Emisiones altas			
GFDL-ESM2M HadGEM2-AO IPSL-CM5A-LR MPI-ESM-MR GFDL-ESM2M HadGEM2-AO IPSL-CM5A-LR MPI-ESM-MR									
Nacional	-1.66	-1.62	-1.59	-1.62	-1.62	-1.64	-1.58	-1.41	-1.03

Fuente: elaboración propia con datos del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

Las siguientes estimaciones consisten en modelos de efectos aleatorios y fijos. Los resultados de dichos modelos confirman que la heterogeneidad entre los estados de la República es estadísticamente significativa, dado que en el caso de los efectos aleatorios se rechaza la hipótesis de que la varianza de los errores sea cero ($\chi^2(1)=19\,786.25$), y en el caso de los efectos fijos, mediante la prueba de significancia conjunta, se rechaza la hipótesis nula de que los efectos fijos estatales no sean importantes ($F(31,1649)=109.68$).

De esta manera, el modelo calculado con el estimador de mínimos cuadrados ordinarios en el cuadro 4.6 (modelo de regresión agrupada) presenta un resultado positivo de las variables climáticas en el PIB per cápita (0.22). La prueba de efectos fijos indica que existe heterogeneidad no observable en el término de error ($\text{prob}=0.4$). Para corregir este resultado sesgado se requiere no ignorar la posible heterogeneidad estatal, motivo por el que los coeficientes parece que van en sentido contrario al señalado por la mayoría de los estudios previos (positivo en lugar de negativo).

En consecuencia, el estimador de efectos fijos es más consistente para determinar el coeficiente del impacto del cambio climático en el PIB. Así, en el cuadro 4.6 también se reportan las regresiones controladas por la heterogeneidad estatal con el modelo de EF y el de efectos aleatorios. Nuevamente, se obtiene un impacto positivo del cambio climático en el PIB (1.49 y 2.19), a pesar de que se controla por la heterogeneidad y la varianza inconstante en dichos modelos, respectivamente.

Cuadro 4.6 Impacto del cambio en la temperatura en el crecimiento del PIB per cápita

Variable dependiente	<i>Pool</i> (MCO)	Efectos aleatorios	Efectos fijos	Efectos fijos con rezagos
Temperatura*	0.22	1.49	2.19	-0.77
Constante	6.38	5.81	5.39	0.98
R ²	0.463	0.455	0.443	0.9756
Significatividad de efectos individuales		19 786.25	109.68	

Fuente: estimaciones propias con base en datos del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

Ahora bien, al realizar la prueba de significancia estadística de rezagos en el panel, se encontró que la mejor especificación consiste en un modelo de efectos fijos con un rezago en la variable dependiente. Así, podemos corregir el sesgo positivo en el coeficiente de impacto, incluyendo rezagos en la especificación del modelo de efectos fijos. Los resultados de este último modelo señalan que el impacto de la temperatura en el PIB es efectivamente negativo, con una magnitud de -0.77% , resultado que es correcto y corrobora la dirección de los resultados de modelos de series de tiempo de la sección anterior (-1.76%).

De igual modo, es posible observar que la magnitud del efecto de la temperatura sobre el PIB per cápita es mayor cuando se trabaja con series de tiempo, que cuando se contempla la heterogeneidad entre estados del modelo de panel. Estos resultados podrían indicar un sesgo de sobreestimación en los resultados de series de tiempo, dado que en los modelos de panel se toma en cuenta la heterogeneidad estatal, pero estas cifras se encuentran en la misma dirección, por lo que con ambas estimaciones se corrobora la robustez estadística de los impactos.

Al igual que en el análisis de temperatura, en el cuadro 4.7 se presentan cuatro diferentes especificaciones para estudiar la relación entre precipitación y crecimiento del PIB per cápita. Cada especificación contempla un supuesto diferente sobre el término de error y el comportamiento entre regiones.

Los resultados del modelo de regresión agrupada (*pool*), el cual asume que no existen diferencias en los impactos entre estados, muestran una relación negativa entre la variable de precipitación y el crecimiento del PIB per cápita. Sin embargo, la significancia estadística de los efectos individuales de la prueba F de efectos fijos ($F=94.81$) indica que la heterogeneidad entre regiones debe contemplarse en la especificación del modelo para no llegar a conclusiones erróneas. Asimismo, la prueba de Hausman ($\text{prob}>\chi^2=0.0027$) corrobora que la estimación de efectos fijos es la especificación adecuada para el modelo en comparación con la estimación de efectos aleatorios.

Cuadro 4.7 Impactos del cambio en la precipitación en el crecimiento del PIB per cápita

Variable dependiente	<i>Pool</i> (MCO)	Efectos aleatorios	Efectos fijos	Efectos fijos con rezagos
Precipitación*	-0.02	0.06	0.01	-0.01
Constante	7.79	6.39	6.39	0.94
R ²	0.513	0.4281	0.4074	0.9755
Significatividad de efectos individuales		16 831.48	94.81	

Fuente: estimaciones propias con base en datos del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

Además, las pruebas de rezagos también señalan que debe incluirse uno en esta modelación de panel. Por ello, la mejor especificación de impacto de la precipitación sobre el PIB per cápita es la que incluye efectos fijos con un rezago en la variable dependiente. En esta especificación final, el aumento de 1 mm en la precipitación anual, producido por el cambio climático, tendría como consecuencia una caída del PIB per cápita de -0.01% , cifra que es consistente con la encontrada en los modelos de series de tiempo (-0.04%).

CONCLUSIONES

En el último siglo, el clima del planeta ha experimentado cambios nunca antes vistos, los cuales se encuentran principalmente asociados con las acciones de la actividad humana. La temperatura media ha aumentado sus niveles considerablemente y los patrones de lluvia han sido más variables. Diversos estudios han estimado que las manifestaciones del cambio climático y sus efectos serán mayores en las siguientes décadas [Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2014a, Nordhaus, 1991]. Además, se sabe que el cambio en las variables climáticas tiene también consecuencias en la esfera económica. A escala global, la cuantificación de los impactos económicos de este cambio aún es un importante desafío y existen pocos estudios que profundicen en el tema a nivel desagregado para nuestro país.

En este estudio, se analizaron los efectos que el cambio climático genera sobre el crecimiento económico en México en los ámbitos estatal y nacional. Para ello, se examinó la relación que existe entre el crecimiento del PIB per cápita y las variables climáticas de temperatura y precipitación mediante modelos econométricos. La metodología empleada para la estimación de los impactos consistió en modelos de corrección de error, a partir de los cuales se realizaron también escenarios de crecimiento económico para el periodo 2014-2100. Se incorporó la metodología de panel para corroborar la robustez de los resultados obtenidos con series de tiempo para controlar los efectos individuales de los estados.

Los resultados del estudio muestran que, al mantener constantes otros factores, el cambio en las variables climáticas podría impactar de manera negativa el crecimiento del PIB

per cápita de México. Un aumento de la temperatura media de 1 °C podría reducir el crecimiento del PIB per cápita nacional entre -0.77 % (metodología de panel) y -1.76 % (metodología de series de tiempo).

A escala subnacional, Baja California e Hidalgo son las entidades más afectadas por el aumento de 1 °C, donde el PIB per cápita podría reducirse -7.52 y -6.84 %, respectivamente. Por el contrario, el aumento de la temperatura podría afectar con poca intensidad a Sinaloa y Puebla; en estos el aumento de 1 °C tendría como consecuencia una caída del PIB per cápita de -0.33 y -0.37 %, en cada caso. Sin embargo, es importante señalar que en todas las entidades federativas el cambio en la temperatura media mostró un impacto negativo sobre el PIB per cápita.

Del mismo modo, el aumento de 1 mm en los niveles de precipitación nacional tendría un efecto negativo sobre el crecimiento del PIB per cápita, de manera que este último se vería reducido entre -0.01 % (metodología de panel) y -0.04 % (metodología de series de tiempo). Entre los más afectados podrían estar Coahuila y Sonora (-0.27 y -0.23 %, respectivamente), mientras que el impacto sería nulo en Guanajuato y Nuevo León. Aunque el efecto del cambio en esta variable es pequeño, resulta importante señalar que es negativo para el resto de los estados.

La variación en la magnitud del impacto del aumento en la temperatura y la precipitación en el PIB estatal puede deberse al tipo de actividades económicas que predominan en la región. También, la implementación de medidas de adaptación y mitigación ante el cambio climático puede reducir su efecto, por ejemplo, la ejecución de un programa de ordenamiento ecológico territorial, manejo de residuos sólidos, manejo forestal, sistema agroforestal y silvopastoril, rotación de cultivos, entre otros.

Finalmente, los escenarios económicos que fueron simulados en este estudio para el periodo 2014-2100 señalan que, de

acuerdo con las proyecciones de cambios en la temperatura y en la precipitación, el crecimiento del PIB per cápita se vería reducido para finales del siglo XXI. Lo anterior bajo las ocho diferentes proyecciones RCP de cambio en las variables climáticas.

La variación de la temperatura podría incidir en la reducción del PIB per cápita del país entre -1.96 y -2.03 % para el año 2100. De igual manera, el cambio en la precipitación quizá frene el crecimiento entre -1.03 % y -1.66 % en dicho periodo.

Como se mencionó, las estimaciones realizadas mediante los modelos de panel muestran resultados muy similares a los de series de tiempo. Por ello, los resultados entre ambas metodologías muestran consistencia y robustez, lo cual confirma que la variación en la temperatura y en la precipitación, provocada por el cambio climático, tendrá efectos adversos sobre el crecimiento económico per cápita del país. Del mismo modo, estos efectos se manifestarán con mayor intensidad en algunos estados debido a la heterogeneidad entre regiones.

A partir de estas conclusiones, es posible reiterar la importancia de las políticas orientadas a disminuir las emisiones de CO_2 a nivel global, esto con una finalidad desde luego ambiental, pero también con la intención de disminuir los impactos negativos en el crecimiento económico para las distintas regiones del mundo.

ANEXOS*

* El material gráfico de esta sección para consulta, también se encuentra en la siguiente liga: <<http://ru.iiec.unam.mx/id/eprint/5037>>.

Los escenarios RCP se caracterizan por el forzamiento radiactivo (FR) total [Observatorio de Salud y Cambio Climático, 2020]; el FR es la diferencia entre la luz solar absorbida y la energía reflejada por la Tierra y la atmósfera [Shindell *et al.*, 2013]. Los escenarios de las trayectorias de concentración representativas son un conjunto de series temporales de emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) y aerosoles y gases químicamente activos, así como el uso y la cobertura del suelo [Moss *et al.*, 2008].

El Grupo de Trabajo III del IPCC produjo modelos de evaluación integrada con pronósticos hasta 2100 con las respectivas emisiones. También proporcionó escenarios de rutas de concentración extendidas que son una trayectoria de concentración de gases invernadero (no emisiones), las cuales son proyecciones de 2100 a 2500 que usan reglas simples generadas por partes y no son representaciones completamente consistentes [Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2014b]. Los RCP proporcionan posibles escenarios que hacen referencia a características específicas del FR. El RCP comprende cuatro modelos de evaluación integrados y son definidos en el quinto informe del IPCC. Los escenarios son a nivel de forzamiento muy bajo (RCP2.6), dos escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones (RCP8.5). Para este estudio se utilizaron los datos de los modelos RCP2.6 y RCP8.5.

El escenario RCP2.6 es una vía donde el forzamiento radiactivo alcanza su punto máximo a aproximadamente 3 W m^{-2} antes de 2100 y luego disminuye. El ECP correspondiente supone emisiones constantes después de 2100 [Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2014b].

El escenario RCP8.5 es una vía alta para la cual el forzamiento radiactivo alcanza más de 8.5 W m^{-2} para 2100 y continúa aumentando durante cierto tiempo. El ECP correspondiente

supone emisiones constantes después de 2100 y concentraciones constantes después de 2250 [Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2014b].

ANEXO A.2. FUENTES DE INFORMACIÓN

Cuadro A.2.1 Fuentes de información

Variable	Fuente de información
PIB per cápita por entidad federativa de México	Germán–Soto e Inegi
<i>Stock</i> de capital	Germán–Soto
Temperatura	IPCCyCentrodeCienciasdelaAtmósfera
Precipitación	IPCCyCentrodeCienciasdelaAtmósfera
Proyección de población	Germán– Soto

Fuente: elaboración propia.

ANEXO A.3. RELACIÓN DEL PIB PER CÁPITA Y TEMPERATURA

Cuadro A.3.1 Relación histórica entre temperatura
y PIB per cápita (1940-2013)

Estado	Logaritmo del PIB per cápita	Temperatura media
Aguascalientes	9.166	18.021
Baja California	9.780	17.849
Baja California Sur	9.703	21.647
Campeche	9.158	26.054
Coahuila	9.550	20.330
Colima	9.368	24.989
Chiapas	8.712	23.508
Chihuahua	9.427	17.460
Ciudad de México	10.002	13.532
Durango	9.010	17.698
Estado de México	9.332	16.484
Guanajuato	8.995	18.442
Guerrero	8.779	24.499
Hidalgo	8.781	17.743
Jalisco	9.407	20.454
Michoacán	8.814	22.019
Morelia	9.163	22.093
Nayarit	9.006	22.700
Nuevo León	9.839	21.437
Oaxaca	8.534	21.319
Puebla	8.903	19.206

continúa...

Cuadro A.3.1 (continuación)

Estado	Logaritmo del PIB per cápita	Temperaturamedia
Querétaro	9.219	19.045
Quintana Roo	9.576	25.751
San Luis Potosí	8.791	19.624
Sinaloa	9.264	23.908
Sonora	9.612	21.451
Tabasco	9.100	26.473
Tamaulipas	9.391	23.308
Tlaxcala	8.804	15.231
Veracruz	9.038	23.909
Yucatán	9.159	25.811
Zacatecas	8.626	17.609

Nota: los valores para cada estado corresponden a la temperatura promedio.

Fuente: elaboración propia con datos del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

Cuadro A.3.2 Relación entre la tasa de crecimiento de la temperatura y la tasa de crecimiento del PIB per cápita (1940-2013)

Estado	Tasa de crecimiento del PIB per cápita	Mediana de la tasa de crecimiento de la temperatura
Aguascalientes	9.166	18.021
Baja California	9.780	17.849
Baja California Sur	9.703	21.647
Campeche	9.158	26.054
Coahuila	9.550	20.330
Colima	9.368	24.989
Chiapas	8.712	23.508
Chihuahua	9.427	17.460
Ciudad de México	10.002	13.532
Durango	9.010	17.698
Estado de México	9.332	16.484
Guanajuato	8.995	18.442
Guerrero	8.779	24.499
Hidalgo	8.781	17.743
Jalisco	9.407	20.454
Michoacán	8.814	22.019
Morelia	9.163	22.093
Nayarit	9.006	22.700
Nuevo León	9.839	21.437
Oaxaca	8.534	21.319
Puebla	8.903	19.206
Querétaro	9.219	19.045

Cuadro A.3.2 (continuación)

Estado	Tasa de crecimiento del PIB per cápita	Mediana de la tasa de crecimiento de la temperatura
Quintana Roo	9.576	25.751
San Luis Potosí	8.791	19.624
Sinaloa	9.264	23.908
Sonora	9.612	21.451
Tabasco	9.100	26.473
Tamaulipas	9.391	23.308
Tlaxcala	8.804	15.231
Veracruz	9.038	23.909
Yucatán	9.159	25.811
Zacatecas	8.626	17.609

Nota: los valores para cada estado corresponden a la mediana de la tasa de crecimiento de la temperatura y la mediana de la tasa de crecimiento del PIB, lo anterior debido a la distribución de los datos.

Fuente: elaboración propia con datos del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

ANEXO A.4. PRUEBAS DE RAÍCES UNITARIAS

Cuadro A.4.1 Prueba de raíz unitaria del PIB per cápita con argumento Dickey-Fuller

Estado	Nivel						Diferencia					
	Intercepto		Tendencia		intercepto		Intercepto		Tendencia		e intercepto	
	Coefficiente	Prob.										
Aguascalientes	-0.331	0.914	-2.535	0.311	-3.221	0.023	-3.147	0.104				
Baja California	-1.733	0.410	-2.830	0.192	-5.228	0.000	-5.255	0.000				
Baja California Sur	-2.281	0.181	-2.699	0.241	-5.178	0.000	-5.225	0.000				
Campeche	-1.599	0.478	-2.148	0.511	-2.829	0.059	-2.873	0.177				
Coahuila	-0.443	0.895	-3.387	0.061	-5.483	0.000	-5.441	0.000				
Colima	-0.982	0.755	-0.997	0.938	-3.694	0.006	-3.707	0.028				
Chiapas	-1.966	0.301	-1.730	0.728	-2.995	0.040	-3.379	0.063				
Chihuahua	-1.205	0.668	-3.693	0.029	-5.359	0.000	-5.387	0.000				
Ciudad de México	0.300	0.977	-3.685	0.030	-4.515	0.001	-4.556	0.003				
Durango	-0.234	0.928	-3.047	0.127	-4.263	0.001	-4.255	0.006				
Guanajuato	-1.518	0.519	-1.354	0.866	-4.703	0.000	-4.850	0.001				
Guerrero	-3.272	0.020	-0.237	0.991	-2.805	0.063	-4.188	0.008				
Hidalgo	-1.722	0.416	-0.942	0.945	-4.442	0.001	-4.665	0.002				
Jalisco	-2.201	0.208	-0.901	0.950	-3.140	0.028	-3.650	0.033				

continúa...

Cuadro A.4.1 (continuación)

Estado	Nivel						Diferencia			
	Intercepto		Tendencia		intercepto		Intercepto		Tendencia e intercepto	
	Coefficiente	Prob.	Coefficiente	Prob.	Coefficiente	Prob.	Coefficiente	Prob.	Coefficiente	Prob.
Morelia	-1.543	0.506	-1.769	0.709	-4.574	0.000	-4.689	0.002		
Nayarit	-2.132	0.233	-1.478	0.828	-3.464	0.012	-3.779	0.024		
Nuevo León	-1.668	0.443	-2.102	0.536	-4.708	0.000	-4.820	0.001		
Oaxaca	-2.053	0.264	-1.406	0.851	-3.032	0.037	-3.278	0.078		
Puebla	-1.603	0.476	-1.217	0.899	-4.187	0.001	-4.384	0.004		
Querétaro	-0.434	0.897	-2.321	0.417	-2.979	0.042	-2.902	0.168		
Quintana Roo	-1.248	0.649	-2.257	0.451	-3.841	0.004	-3.810	0.022		
San Luis Potosí	-1.062	0.726	-2.892	0.171	-4.452	0.001	-4.438	0.004		
Sinaloa	-3.254	0.021	-1.562	0.798	-3.699	0.006	-4.610	0.002		
Sonora	-1.851	0.353	-2.843	0.188	-5.235	0.000	-5.270	0.000		
Tabasco	-1.745	0.405	-1.349	0.867	-2.191	0.211	-2.307	0.424		
Tamaulipas	-0.740	0.829	-1.877	0.656	-3.948	0.003	-3.942	0.015		
Tlaxcala	-1.548	0.504	-0.845	0.956	-2.806	0.063	-2.971	0.148		
Veracruz	-3.499	0.011	-3.336	0.069	-3.122	0.029	-3.168	0.099		
Yucatán	-0.702	0.839	-1.694	0.744	-3.814	0.004	-3.807	0.022		
Zacatecas	-1.266	0.641	-3.539	0.043	-4.818	0.000	-4.812	0.001		

Fuente: elaboración propia con datos de Germán-Soto (2005).

Cuadro A.4.2 Prueba de raíz unitaria del PIB per cápita con argumento Phillips-Perron

Estado	Nivel						Diferencia					
	Intercepto		Tendencia		intercepto		Intercepto		Tendencia		intercepto	
	Coefficiente	Prob.										
Aguascalientes	0.274	0.975	-2.580	0.291	-4.624	0.000	-4.643	0.002				
Baja California	-2.175	0.217	-2.825	0.193	-8.241	0.000	-8.233	0.000				
Baja California Sur	-2.311	0.171	-3.064	0.123	-7.639	0.000	-7.651	0.000				
Campeche	-1.628	0.463	-1.288	0.883	-5.358	0.000	-5.313	0.000				
Coahuila	-1.077	0.721	-4.197	0.007	-10.050	0.000	-9.965	0.000				
Colima	-0.556	0.873	-1.238	0.895	-6.984	0.000	-6.963	0.000				
Chiapas	-2.185	0.214	-0.640	0.973	-3.074	0.033	-3.449	0.053				
Chihuahua	-1.907	0.327	-4.886	0.001	-8.709	0.000	-8.658	0.000				
Ciudad de México	0.231	0.973	-2.909	0.166	-7.012	0.000	-7.078	0.000				
Durango	-0.265	0.924	-2.772	0.212	-7.135	0.000	-7.152	0.000				
Estado de México	-3.448	0.012	-0.831	0.958	-5.932	0.000	-6.937	0.000				
Guanajuato	-1.622	0.467	-1.562	0.798	-7.620	0.000	-7.674	0.000				
Guerrero	-5.146	0.000	-0.827	0.958	-6.139	0.000	-7.757	0.000				
Hidalgo	-1.393	0.581	-1.007	0.936	-6.978	0.000	-7.144	0.000				
Jalisco	-2.942	0.045	-0.713	0.968	-5.247	0.000	-5.873	0.000				
Michoacán	-2.432	0.137	-0.773	0.963	-5.171	0.000	-5.448	0.000				

continúa...

Cuadro A.4.2 (continuación)

Estado	Nivel						Diferencia	
	Intercepto		Tendenciaeintercepto		intercepto		Tendenciaeintercepto	
	Coficiente	Prob.	Coficiente	Prob.	Coficiente	Prob.	Coficiente	Prob.
Nuevo León	-1.825	0.366	-2.335	0.410	-7.231	0.000	-7.262	0.000
Oaxaca	-3.660	0.007	-1.644	0.766	-4.406	0.001	-4.799	0.001
Puebla	-2.518	0.116	-1.946	0.620	-7.927	0.000	-7.927	0.000
Querétaro	0.031	0.958	-2.251	0.454	-5.078	0.000	-5.119	0.000
Quintana Roo	-1.106	0.709	-2.450	0.352	-7.302	0.000	-7.246	0.000
San Luis Potosí	-1.232	0.656	-2.862	0.181	-7.204	0.000	-7.193	0.000
Sinaloa	-4.238	0.001	-1.961	0.612	-7.904	0.000	-8.902	0.000
Sonora	-2.215	0.203	-3.500	0.047	-7.511	0.000	-7.477	0.000
Tabasco	-1.653	0.451	-0.901	0.950	-4.678	0.000	-4.858	0.001
Tamaulipas	-1.002	0.749	-1.530	0.810	-7.465	0.000	-7.424	0.000
Tlaxcala	-1.439	0.559	-0.420	0.985	-5.645	0.000	-5.906	0.000
Veracruz	-6.539	0.000	-5.348	0.000	-6.394	0.000	-6.810	0.000
Yucatán	-0.823	0.807	-1.545	0.805	-6.993	0.000	-6.949	0.000
Zacatecas	-1.517	0.520	-3.668	0.031	-7.514	0.000	-7.489	0.000

Fuente: elaboración propia con datos de Germán-Soto (2005).

ANEXO A.5. PRUEBAS DE ESPECIFICACIÓN CORRECTA DE LOS MODELOS DE CORRECCIÓN DE ERROR

Cuadro A.5.1 Pruebas estadísticas de los modelos de temperatura por entidad.

Estado	Normalidad		Sin autocorrelación		Heterocedasticidad			
	Jarque-Bera		F-statistic		Breusch-Pagan-Godfrey		ARCH	
	Prob.	Prob.	F-statistic	Prob.	F-statistic	Prob.	F-statistic	Prob.
Aguascalientes	1.699	0.428	2.823	0.068	0.510	0.603	0.012	0.912
Baja California	4.616	0.099	2.479	0.095	1.170	0.330	1.896	0.175
Baja California Sur	62.892	0.000	1.738	0.189	0.756	0.559	5.054	0.029
Campeche	17.101	0.000	3.878	0.032	5.269	0.005	1.344	0.255
Coahuila	2.446	0.294	1.724	0.186	1.026	0.364	0.134	0.716
Colima	10.785	0.005	0.051	0.951	1.665	0.174	0.001	0.974
Chiapas	3.992	0.136	4.253	0.020	6.555	0.000	0.314	0.578
Chihuahua	0.231	0.891	0.599	0.554	1.320	0.264	0.077	0.782
Ciudad de México	0.447	0.800	0.486	0.618	0.226	0.878	2.308	0.135
Durango	4.676	0.097	0.960	0.388	6.958	0.000	14.542	0.000
Estado de México	0.502	0.778	1.006	0.375	4.126	0.024	1.025	0.318
Guanajuato	7.303	0.026	0.341	0.713	3.398	0.025	0.441	0.510
Guerrero	2.883	0.237	0.746	0.481	1.029	0.390	0.061	0.806
Hidalgo	2.704	0.259	0.865	0.428	2.235	0.096	3.646	0.062
Jalisco	0.699	0.705	0.703	0.501	0.717	0.584	0.113	0.738

continúa...

Cuadro A.5.1 (continuación)

Estado	Normalidad		Sin autocorrelación		Heterocedasticidad			
	Jarque-Bera		F-statistic		Breusch-Pagan-Godfrey		ARCH	
	Prob.	Prob.	F-statistic	Prob.	F-statistic	Prob.	F-statistic	Prob.
Nayarit	0.490	0.783	0.258	0.774	1.779	0.149	0.687	0.411
Nuevo León	4.335	0.114	2.599	0.086	0.628	0.600	5.517	0.023
Oaxaca	3.114	0.211	13.184	0.000	10.761	0.002	10.761	0.002
Puebla	0.390	0.823	0.727	0.489	1.825	0.126	0.274	0.603
Querétaro	4.484	0.106	1.344	0.269	1.295	0.282	0.308	0.581
Quintana Roo	3.106	0.212	1.796	0.178	2.320	0.071	1.949	0.169
San Luis Potosí	8.950	0.011	0.320	0.728	0.981	0.426	0.390	0.535
Sinaloa	0.713	0.700	0.902	0.413	1.929	0.121	0.000	0.997
Sonora	3.825	0.148	3.517	0.039	2.167	0.064	1.125	0.294
Tabasco	49.728	0.000	0.318	0.730	4.475	0.001	0.033	0.856
Tamaulipas	1.529	0.466	0.035	0.966	2.252	0.077	0.043	0.836
Tlaxcala	0.086	0.958	0.925	0.404	1.015	0.420	0.050	0.824
Veracruz	0.011	0.995	0.192	0.826	2.001	0.096	0.303	0.584
Yucatán	1.466	0.480	1.190	0.314	0.687	0.605	0.024	0.878
Zacatecas	15.470	0.000	1.503	0.234	2.090	0.113	4.540	0.038
Nacional	1.812	0.404	1.464	0.243	2.435	0.049	0.136	0.714

Fuente: elaboración propia con base en los modelos ECM estatales y nacionales.

Cuadro A.5.2 Pruebas estadísticas de los modelos de precipitación por entidad

Estado	Normalidad			Sin autocorrelación			Heterocedasticidad		
	Jarque-Bera			Breusch-Pagan-Godfrey			ARCH		
	Prob.	F-statistic	Prob.	F-statistic	Prob.	F-statistic	Prob.	F-statistic	Prob.
Aguascalientes	2.824	0.244	3.096	0.056	1.933	0.107	0.000	0.998	
Baja California	9.386	0.009	0.659	0.522	0.764	0.554	0.413	0.524	
Baja California Sur	67.313	0.000	0.119	0.888	0.391	0.760	0.227	0.636	
Campeche	13.288	0.001	1.109	0.340	1.396	0.244	0.311	0.579	
Coahuila	2.813	0.245	1.762	0.179	0.101	0.905	0.077	0.782	
Colima	4.211	0.122	1.256	0.295	0.908	0.467	0.040	0.843	
Chiapas	4.631	0.099	3.047	0.058	1.606	0.168	0.203	0.654	
Chihuahua	0.766	0.682	0.659	0.522	2.715	0.055	0.132	0.718	
Ciudad de México	0.654	0.721	0.066	0.054	0.371	0.774	0.013	0.909	
Durango	10.370	0.005	1.143	0.329	1.088	0.373	1.595	0.212	
Estado de México	0.214	0.898	0.029	0.971	0.899	0.472	0.776	0.383	
Guanajuato	7.787	0.020	0.347	0.709	2.998	0.040	0.422	0.519	
Guerrero	0.134	0.935	1.249	0.293	2.612	0.058	0.059	0.809	
Hidalgo	7.985	0.018	1.085	0.347	1.026	0.403	0.178	0.675	
Jalisco	4.935	0.085	0.367	0.695	2.002	0.085	1.229	0.273	
Michoacán	0.767	0.682	0.508	0.604	0.115	0.951	0.631	0.430	
Morelos	23.596	0.000	0.557	0.575	2.357	0.079	1.200	0.277	

continúa...

Cuadro A.5.2 (continuación)

Estado	Normalidad			Sin autocorrelación			Heterocedasticidad		
	Jarque-Bera			F-statistic			Breusch-Pagan-Godfrey		
	Prob.	F-statistic	Prob.	F-statistic	Prob.	F-statistic	Prob.	F-statistic	Prob.
Oaxaca	0.213	0.899	0.099	0.906	2.024	0.119	0.008	0.928	
Puebla	7.644	0.022	1.302	0.282	0.403	0.806	0.153	0.698	
Querétaro	6.871	0.032	0.633	0.535	0.786	0.540	0.104	0.748	
Quintana Roo	12.427	0.002	2.526	0.091	1.590	0.204	0.201	0.656	
San Luis Potosí	16.099	0.000	0.905	0.412	1.909	0.141	0.215	0.645	
Sinaloa	0.708	0.702	0.507	0.606	1.167	0.337	0.763	0.386	
Sonora	7.580	0.023	4.623	0.013	0.208	0.813	1.717	0.194	
Tabasco	9.204	0.010	0.982	0.383	0.548	0.701	0.345	0.560	
Tamaulipas	2.028	0.363	0.060	0.942	1.830	0.139	0.028	0.869	
Tlaxcala	0.258	0.879	1.062	0.354	0.966	0.388	0.226	0.637	
Veracruz	1.009	0.604	1.127	0.569	0.410	0.801	2.067	0.157	
Yucatán	0.450	0.798	3.502	0.174	0.657	0.625	0.736	0.395	
Zacatecas	3.900	0.142	0.421	0.659	3.892	0.014	3.017	0.088	
Nacional	3.469	0.177	0.775	0.467	3.765	0.017	0.000	0.995	

Fuente: elaboración propia con base en los modelos ECM estatales y nacionales.

ANEXO A.6. PRUEBAS DE LOS MODELOS TIPO PANEL

Cuadro A.6.1 Modelo de efectos fijos para temperatura y precipitación

	Temperatura		Precipitación	
	Coficiente	Std. Err.	Coficiente	Std. Err.
Log($y_p(-1)$)	0.891***	(0.010)	0.900***	(0.009)
Log(k_p)	0.012***	(0.003)	0.162***	(0.023)
Log($k_p(-1)$)			-0.153***	(0.022)
Log(t_{mean})	-0.017	(0.097)		
Log(pcp)			0.014	(0.010)
Log($pcp(-1)$)			-0.026***	(0.010)
Baja California	0.009	(0.020)	-0.002	(0.022)
Baja California Sur	0.026	(0.026)	0.012	(0.021)
Campeche	0.007	(0.040)	0.019	(0.020)
Coahuila	0.001	(0.022)	-0.002	(0.017)
Colima	-0.008	(0.037)	-0.001	(0.018)
Chiapas	-0.062**	(0.035)	-0.050**	(0.024)
Chihuahua	0.005	(0.020)	0.007	(0.016)
Ciudad de México	0.058**	(0.034)	0.072***	(0.019)
Durango	-0.032	(0.020)	-0.024	(0.015)
Estado de México	-0.031	(0.022)	-0.011	(0.018)
Guanajuato	-0.036**	(0.020)	-0.031*	(0.016)
Guerrero	-0.061	(0.037)	-0.055***	(0.019)
Hidalgo	-0.071***	(0.021)	-0.053***	(0.019)
Jalisco	-0.011	(0.023)	-0.001	(0.017)
Michoacán	-0.065**	(0.029)	-0.050***	(0.018)

continúa...

Cuadro A.6.1 (continuación)

	Temperatura		Precipitación	
	Coefficiente	Std. Err.	Coefficiente	Std. Err.
Nayarit	-0.043	(0.030)	-0.035*	(0.019)
Nuevo León	0.029	(0.025)	0.030*	(0.016)
Oaxaca	-0.081***	(0.028)	-0.067***	(0.021)
Puebla	-0.056***	(0.021)	-0.038**	(0.019)
Querétaro	-0.007	(0.020)	0.000	(0.016)
Quintana Roo	0.048	(0.042)	0.054***	(0.020)
San Luis Potosí	-0.043**	(0.022)	-0.036**	(0.016)
Sinaloa	-0.020	(0.034)	-0.016	(0.016)
Sonora	0.020	(0.026)	0.013	(0.016)
Tabasco	-0.029	(0.042)	-0.02	(0.025)
Tamaulipas	-0.003	(0.032)	-0.002	(0.016)
Tlaxcala	-0.078***	(0.026)	-0.056***	(0.018)
Veracruz	-0.060*	(0.034)	-0.043*	(0.023)
Yucatán	-0.030	(0.040)	-0.02	(0.018)
Zacatecas	-0.063***	(0.020)	-0.058***	(0.016)
Constante	0.975***	(0.278)	0.940***	(0.101)

Fuente: elaboración propia con base en los modelos de tipo panel.

Cuadro A.6.2. Prueba F *pool* vs. modelo de efectos fijos para temperatura y precipitación

Prueba F test que todos los $u_i=0$		
Temperatura	F(31, 1694)=109.68	Prob > F = 0.0000
Precipitación	F(31, 1694)=94.81	Prob > F = 0.0000

Fuente: elaboración propia con base en los modelos de tipo panel.

Cuadro A.6.3. Prueba Breusch y Pagan para temperatura y precipitación

	Temperatura		Precipitación	
Resultados estimados:				
	Var	sd=sqrt(Var)	Var	sd=sqrt(Var)
lypc	0.274	0.524	0.274	0.524
e	0.050	0.223	0.050	0.223
u	0.106	0.325	0.089	0.298
Test: Var(u) = 0				
chibar2 (01)=	19 786.25		16 831.48	
Prob>chibar2 =	0.0000		0.0000	

Fuente: elaboración propia con base en los modelos de tipo panel.

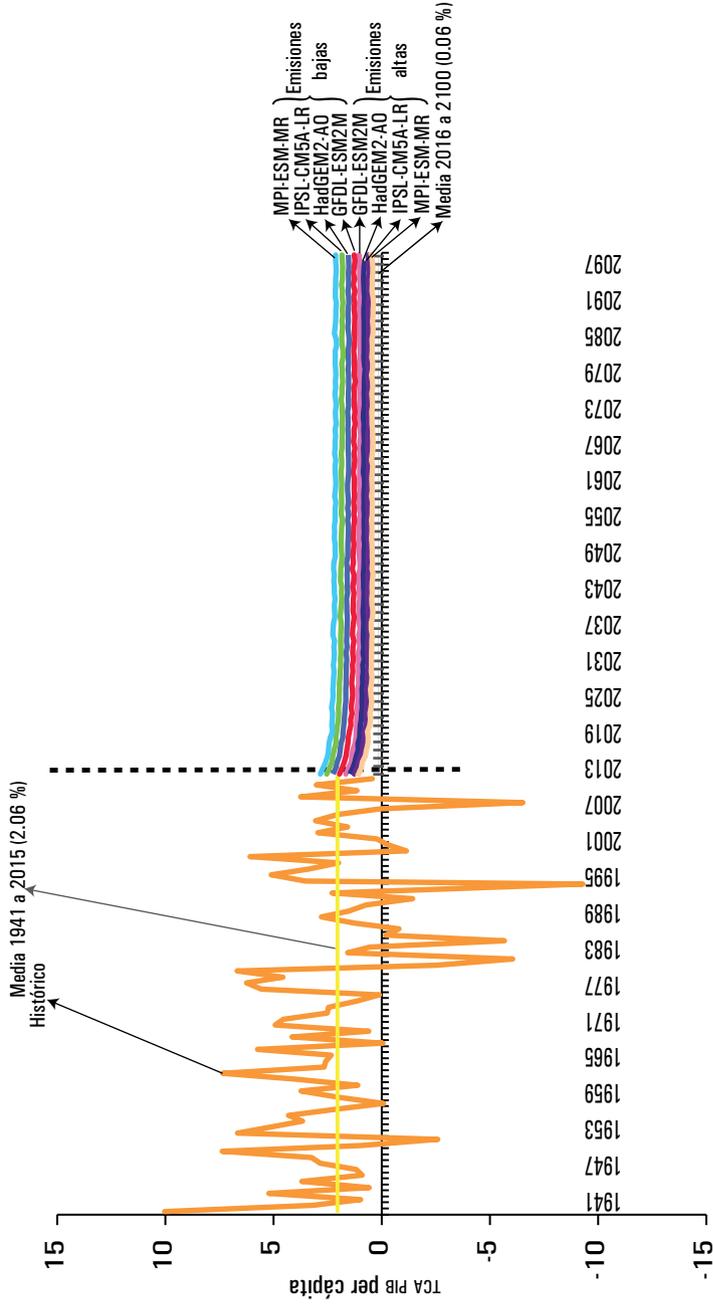
Cuadro A.6.4 Prueba de Hausman para temperatura y precipitación.

	Coeficiente		(b-B) Diferencia	sqrt(diag(V_b-V_B)) S.E.
	(b) Fixedp	(B) Randomp		
Temperatura				
lkpc	0.250	0.252	-0.002	0.002
lpcp	0.458	0.311	0.147	0.143
Test: Ho: diferencia en coeficientes no sistemáticos				
chi2(2)=	$(b-B)'[(V_b-V_B)^{-1}](b-B) = 1.64$			
Prob > chi2=	0.440			
Precipitación				
lkpc	0.254	0.255	-0.001	0.000
lpcp	0.078	0.051	0.026	0.008
Test: Ho: diferencia en coeficientes no sistemáticos				
chi2(2)=	$(b-B)'[(V_b-V_B)^{-1}](b-B) = 11.87$			
Prob > chi2=	0.003			

Fuente: elaboración propia con base en los modelos de tipo panel.

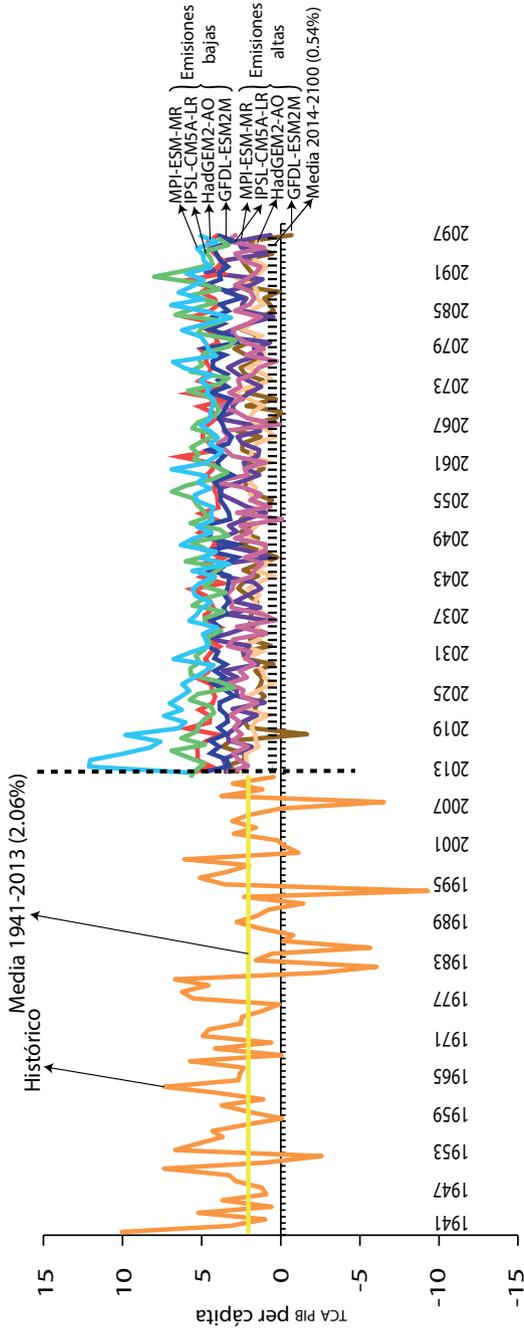
ANEXO B.1. CRECIMIENTO DEL PIB PER CÁPITA DE ACUERDO CON ESCENARIOS DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN NACIONAL

Gráfica B.1 Crecimiento del PIB per cápita de acuerdo con escenarios de temperatura para México (1941-2100)



Fuente: elaboración propia con datos del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

Gráfica B.2 Crecimiento del PIB per cápita de acuerdo con escenarios de temperatura para México (1941-2100)



Fuente: elaboración propia con datos del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

REFERENCIAS

- Baltagi, Badi [1995], *Econometric analysis of panel data*, John Wiley & Sons, 320 pp.
- Barrios, Salvador, Luisito Bertinelli y Eric Strobl [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.
- Belhabib, Dyhia, Vicky Lam y William Cheung [2016], “Overview of West African fisheries under climate change: Impacts, vulnerabilities and adaptive responses of the artisanal and industrial sectors”, *Marine Policy*, 71: 15-28.
- Breusch, Trevor Stanly y Adrian Pagan [1980], “The LM Test and its applications to Model Specification in Econometrics”, *Review of Economic Studies*, 47(1): 239-254.
- Cachon, Gerard, Santiago Gallino y Marcelo Olivares [2012], “Severe weather and automobile assembly productivity”, *Columbia Business School Research*, Paper No. 12/37.
- Centro de Ciencias de la Atmósfera [2014], “Repositorio Institucional Centro de la Ciencias de la Atmósfera, UNAM”, enero, <<https://cutt.ly/Jd0gXWu>>.
- Dell, Melissa, Benjamin Jones y Benjamin Olken [2014], “What do we learn from the weather? The new climate – economy literature”, *Journal of Economic Literature*, 52(3): 740-798.
- _____ [2012], “Temperature shocks and economic growth: Evidence from the last half century”, *American Economic Journal: Macroeconomics*, 4(3): 66-95.

- _____ [2009], “Temperature and Income: Reconciling New Cross-Sectional and Panel Estimates”, *American Economic Review: Papers & Proceeding*, 99(2): 198-204.
- _____ [2008], “Climate change and economic growth: Evidence from the last half century”, *Working Paper*, 14132, National Bureau of Economic Research.
- Deschênes, Olivier y Enrico Moretti [2009], “Extreme weather events, mortality, and migration”, *The Review of Economics and Statistics*, 91(4): 659-681.
- Deschênes, Olivier y Michael Greenstone [2007], “The economic impacts of climate change: Evidence from agricultural profits and random fluctuations in weather”, *American Economic Review*, 97(1): 354-385.
- Enders, Walter [2003], *Applied econometric times series*, John Wilwy & Sons, 460 pp.
- Engel, Robert y Clive Granger [1987], “Co-integration and error correction: Representation, estimation, and testing”, *Econometrica*, 55(2): 251-276.
- Estrada, Francisco *et al.* [2013], “The economics of climate change in Mexico: implications for national/regional policy”, *Climate Policy*, 13(6): 738-750.
- Federspiel, Clifford *et al.* [2004], “Worker performance and ventilation in a call center: Analyses of Work Performance Data for Register Nurses”, *Indoor Air*, 14(8): 41-50.
- Gallup, John, Jeffrey Sachs y Andrew Mellinger [1999], “Geography and economic development”, *Working Paper*, 6849, National Bureau of Economic Research.
- Gay, Carlos *et al.* [2006], “Potential impacts of climate change on agriculture: A case of study of coffee production in Veracruz, México”, *Climatic Change*, 79: 259-288.
- Gómez, J., J. Tinoco y A. Monterroso [2011], “Efectos del cambio climático en la distribución potencial del maíz en el estado de Jalisco, México”, *Terra Latinoamericana*, 29(2): 161-168.

- Greene, William [2012], *Econometric analysis*, Nueva York, Pearson, pp. 385-473.
- Guiteras, Raymond [2007], “The impact of climate change on Indian agriculture”, *Working Paper*, Department of Economics, MIT press.
- Gujarati, Damodar [2001], *Econometría*, México, McGraw-Hill, 823 pp.
- Hausman, Jerry A. [1978], “Specification test in econometrics”, *Econometrica*, 46: 1251-1271.
- Horowitz, John [2009], “The income-temperature relationship in a cross-section of countries and its implications for predicting the effects of global warming”, *Environmental Resource Econ*, 44: 475-493.
- Hsiang, Solomon [2010], “Temperatures and cyclones strongly associated with economic production in the Caribbean and Central America”, *PNAS*, 107(35): 15367-15372.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [2014a], *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, Suiza, IPCC, 157 pp.
- _____ [2014b], *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*, Reino Unido y Nueva York, EUA, IPCC, 1435 pp. Data Distribution Center “Definition of Terms Used Within the DDC Page”, IPCC, <<https://cutt.ly/8d0g2Pz>>, 13 de enero de 2020.
- _____ [2013], “Glosario”, en S. Planton (ed.), *Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, Cambridge University Press, United Nations Environment Programme (UNEP) and the World Health Organization (WHO).

- Jones, Benjamin y Benjamin Olken [2010], “Climate shocks and exports”, *American Economic Review: Papers & Proceeding*, 100(2): 454-459.
- Mayorga, Mauricio y Evelyn Muñoz [2000], *La técnica de datos de panel: una guía para su uso e interpretación*, Banco Central de Costa Rica, División Económica, Departamento de Investigaciones Económicas, Documento de trabajo, Costa Rica.
- Mills, Terence [2019], *Applied times Series Analysis. A practical guide to modeling and forecasting*, Academic Press, 354 pp.
- Montero, Roberto [2011], *Efectos fijos o aleatorios: test de especificación*. Documentos de Trabajo en Economía Aplicada, Universidad de Granada, España.
- Moss, R., M. *et al.* [2008], *Towards new Scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts and response strategies*, Switzerland, Intergovernmental Panel on Climate Change, 132 pp.
- Nakicenovic, N., R. J. Lempert y A. C. Janetos A.C. [2013], “A framework for the development of new socio-economic scenarios for climate change research: Introductory essay”, *Climatic Change*, 351-361, doi: 10.1007/s10584-013-0982-2
- National Aeronautics and Space Administration [2011], “What are climate and climate change?”, 10 de octubre, <<https://cutt.ly/yd0hvuZ>>.
- Niemelä, Raimo *et al.* [2002], “The Effect of Air Temperature on Labour Productivity in Call Centres – a case study”, *Energy and Buildings*, 34: 759-764.
- Nordhaus, William [1991], “A Sketch of the Economics of the Greenhouse Effect”, *The American Economic Review*, 81(2): 146-150.
- Nordhaus, William [2006] “Geography and macroeconomics: New data and new findings”, *PNAS*, 3(10): 3511-3517.

- Observatorio de Salud y Cambio Climático [2020], “Nuevos escenarios de emisión: RCPS”, OSCC, 13 de enero, <<https://cutt.ly/yd0hvuz>>.
- Sachs, Jeffrey [2001], “Tropical Underdevelopment”, *Working Paper*, 8119, National Bureau of Economic Research.
- Schlenker, Wolfram, Michael Henemann y Anthony Fisher [2006], “The impact of global warming on U.S. agriculture: An econometric analysis of optimal growing conditions”, *The Review of Economics and Statistics*, 88(1): 113-125.
- Senapati, Manas, Bhagirathi Behera y Ranjan Mishra [2012], “Impact of climate change on Indian agriculture & its mitigating priorities”, *American Journal of Environmental Protection*, 1(4): 109-111.
- Shindell, Drew *et al.* [2013], “Radiative forcing in the ACCMIP historical and Future Climate Simulations”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(6): 2939-2974.
- Tol, Richard [2014], “Correction and update: The economic effects of climate change”, *Journal of Economic Perspectives*, 28(2): 221-226.
- [2009], “The economic effects of climate change”, *Journal of Economic Perspectives*, 23(2): 29-51.