

# **“La resiliencia económica y el cambio climático. Una propuesta de modelo matemático macroeconómico para futuras calibraciones de la política fiscal”<sup>1</sup>**

## **Resumen**

El artículo presenta una propuesta de modelo macroeconómico de generaciones superpuestas con tres sectores: hogares (con vida útil limitada, dividido en tres niveles educativos), empresas y gobierno, que incluye proyecciones demográficas y de capital humano a largo plazo para evaluar el crecimiento de la producción considerando que el objetivo es incrementar la resiliencia del stock de capital y adaptar la infraestructura pública a los efectos del calentamiento global gradual del cambio climático. Para ello, se supone que el gobierno financia la inversión pública incrementando el déficit público. Es pertinente aclarar que el gobierno puede financiar la inversión en adaptación aumentando los impuestos o reduciendo las transferencias y otros gastos. Además, puede imponer impuestos precautorios para reducir la deuda pública en caso de eventos extremos. En este último caso, el país también puede contar con la ayuda de subvenciones externas.

El modelo propuesto supone que el gobierno internaliza la probabilidad de quedar aislado del mercado de capitales en caso de un aumento inesperado en la demanda de capital de la economía nacional. De hecho, el aumento del nivel de deuda debido al deterioro de los ingresos fiscales provocaría una incapacidad para acceder al mercado de capitales que podría afectar la capacidad de las empresas para financiar la reconstrucción del stock de capital. Por lo tanto, para evitar este evento, se asume que el gobierno puede anticipar tales eventos reduciendo el stock de deuda pública y la probabilidad de alcanzar la restricción de endeudamiento e incrementar los costos de reconstrucción.

**Palabras clave:** resiliencia económica, política fiscal, cambio climático

**JEL:** E62-H54-Q54

## **Abstract**

This article presents a proposal for a macroeconomic model of overlapping generations with three sectors: households (with limited useful life, divided into three educational levels), companies and government, which includes long-term demographic and human capital projections to evaluate the growth of production considering that the objective is to increase the resilience of the capital stock and adapt public infrastructure to the effects of gradual global warming from climate change. To do this, it is assumed that the government finances public investment by increasing the public deficit. It is pertinent to clarify that the government can finance investment in adaptation by increasing taxes or reducing transfers and other expenses. In addition, it can impose precautionary taxes to reduce public debt in case of extreme events. In the latter case, the country can also count on the help of external subsidies.

---

<sup>1</sup> Dr. Darío Ezequiel Díaz

Escuela de Graduados de la Facultad de Ciencias Económicas de la Universidad Nacional de Córdoba

Posdoctorando Retos Poblacionales Actuales-UNC

Antonio Llamas 2987-Posadas. Prov. De Misiones. CPA N3300CNI

Correo electrónico: [drdarioezequieldiaz@gmail.com](mailto:drdarioezequieldiaz@gmail.com). Celular 3764333378

The proposed model assumes that the government internalizes the probability of being isolated from the capital market in the event of an unexpected increase in the demand for capital in the national economy. In fact, the increase in the level of debt due to the deterioration of tax revenues would cause an inability to access the capital market that could affect the ability of companies to finance the reconstruction of the capital stock. Therefore, to avoid this event, it is assumed that the government can anticipate such events by reducing the stock of public debt and the probability of reaching the debt constraint and increasing reconstruction costs.

**Keywords:** economic resilience, fiscal policy, climate change

## 1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático y los desastres naturales relacionados con el clima plantean una amenaza creciente tanto para los países desarrollados como para los países en desarrollo. Sin embargo, los países en desarrollo son particularmente vulnerables al cambio climático porque tienen menos recursos financieros e institucionales para contrarrestar su impacto negativo. La capacidad de los países en desarrollo para adaptarse a un clima cambiante o para hacer frente a fenómenos meteorológicos extremos, como inundaciones, huracanes o sequías, tiende a ser mucho más limitada que la de sus pares más ricos. Los mercados de seguros subdesarrollados agravan los riesgos del cambio climático, en particular la amenaza que esos riesgos representan para los hogares de bajos ingresos.

Además de su devastador costo en vidas y propiedades, el cambio climático y los desastres naturales tienen importantes consecuencias fiscales. Los cambios graduales en la temperatura y las precipitaciones pueden alterar profundamente las actividades económicas, especialmente en sectores que son altamente sensibles a las condiciones climáticas, como la agricultura, la pesca y el turismo, con importantes implicaciones para el nivel y la composición de los ingresos fiscales.

Mientras tanto, los desastres naturales y las perturbaciones relacionadas con el clima pueden exacerbar la volatilidad de los ingresos y ralentizar el crecimiento potencial del producto interno bruto (PIB). Los desastres naturales pueden debilitar gravemente la posición fiscal de un gobierno debido a los costos a corto plazo del socorro en casos de desastre, los costos a largo plazo de la reconstrucción y el impacto en los ingresos perdidos del capital dañado y la actividad económica deprimida.

Varios factores influyen en las consecuencias fiscales de los desastres naturales y el cambio climático, incluido el grado de exposición de una economía, el nivel de protección ya existente y la responsabilidad del estado por los daños incurridos. El costo de hacer frente a estos impactos puede ser extremadamente alto, y puede amenazar su sostenibilidad fiscal y el futuro de sus esfuerzos de desarrollo.

La política fiscal puede desempeñar un papel clave en la mitigación del cambio climático y la adaptación a sus efectos, sin embargo, la literatura internacional sobre las implicaciones fiscales del cambio climático sigue siendo limitada.

Este artículo tiene como objetivo contribuir a una mejor comprensión de cómo la política fiscal puede ayudar a los países a adaptarse a los efectos graduales a largo plazo del

cambio climático y hacer frente al grave impacto a corto plazo de los desastres naturales relacionados con el clima. Para ello utiliza un modelo macroeconómico simplificado de una economía abierta con generaciones superpuestas (OLG) en la que se supone que el cambio climático afecta la tasa de depreciación del stock de capital. El modelo incluye los costos de ajuste de capital y las restricciones de endeudamiento externo. Se diferencia entre los impactos del cambio climático que ocurren lentamente, con costos que aumentan con el tiempo (factores graduales) y los efectos que se manifiestan como desastres repentinos e impredecibles (eventos extremos).

El estudio evalúa la eficacia relativa de dos estrategias diferentes: (i) la acción preventiva, bajo la cual los responsables de la formulación de políticas implementan medidas de adaptación en previsión de los efectos del cambio climático, y (ii) la acción correctiva, bajo la cual los responsables de la formulación de políticas se centran únicamente en responder a los impactos que ya han ocurrido. El análisis revela que la acción preventiva conduce a tasas de crecimiento del PIB más altas que no tomar medidas o esperar hasta que sea necesaria una acción correctiva. Las inversiones preventivas en la adaptación al cambio climático, financiadas por impuestos o por la reducción del gasto en otras áreas, pueden aumentar la resiliencia del stock de capital, mantener la dinámica de la deuda pública en términos de solvencia y mantener una política fiscal adecuada para hacer frente a los desastres naturales mientras se accede a los mercados internacionales de capital.

## **2. LA MACROECONOMÍA DEL CAMBIO CLIMÁTICO**

Los costos macroeconómicos del cambio climático se pueden agrupar en tres categorías: mitigación, adaptación y costos residuales.

La mitigación incluye todos los costos incurridos por las políticas que ralentizan el ritmo y limitan la gravedad del cambio climático, particularmente a través de la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

La adaptación incluye todos los costos incurridos por los esfuerzos, tanto preventivos como correctivos, para reducir el impacto social, ambiental y económico del cambio climático.

Los costos residuales son efectos del cambio climático que no pueden compensarse mediante la mitigación o la adaptación.

La mayoría de los modelos macroeconómicos se centran en evaluar los costos de mitigación y los costos residuales. Por ejemplo, Stern (2007), Nordhaus (2007, 2008), Bonen et al. (2016) utilizan modelos de evaluación integrada (IAM: integrated assessment model) para cuantificar los daños causados por el cambio climático y el costo de los esfuerzos para limitar su alcance. Estos modelos aplican funciones de daño (Bonen, Semmler y Klasen, 2014) que se aproximan a la relación entre los cambios de temperatura global y los fenómenos relacionados con el clima, como el aumento del nivel del mar, los ciclones más frecuentes, la pérdida de productividad agrícola y los servicios ecosistémicos degradados.

La mayoría de los IAM tratan los daños relacionados con el clima como una función polinómica de la temperatura media global y examinan su impacto en el stock de capital a

nivel regional o mundial<sup>2</sup>. Por el contrario, la literatura sobre las implicaciones macroeconómicas de la adaptación al cambio climático es relativamente limitada. Los primeros IAM ignoraron la adaptación o la trataron como implícita en la función de daño. Los IAM más recientes incluyen una representación dinámica de los costos y beneficios de la adaptación. Estos modelos encuentran que las políticas climáticas óptimas implican tanto la adaptación como la mitigación<sup>3</sup>. Bonen et al. (2016) muestran que, cuando la política de mitigación está sujeta a rendimientos decrecientes, es óptimo combinar la mitigación con la adaptación.

Sin embargo, debido a que no existe un nivel de mitigación y adaptación que pueda compensar plenamente los costos del cambio climático, el daño residual siempre es un factor. La adaptación se vuelve menos efectiva a temperaturas más altas. Burke, Hsiang y Miguel (2015) argumentan que el impacto de las temperaturas en la productividad no es lineal; más bien, es positivo a bajas temperaturas y alcanza su punto máximo a una temperatura promedio de 13 grados centígrados, después de lo cual se vuelve cada vez más negativo. También encuentran que los países más ricos y más pobres están sujetos a efectos no lineales similares y que no hay evidencia de que la experiencia adquirida en contextos de altas temperaturas pueda informar con precisión la respuesta global al cambio climático. Una vez que los países superan una temperatura umbral dada, la correlación entre su desempeño económico y los aumentos adicionales de temperatura se vuelve más intensamente negativa. En otras palabras, cuanto más cálido sea un país ahora, más grave será el daño económico de un mayor calentamiento.

En consecuencia, un rápido aumento de las temperaturas mundiales debilitaría la eficacia de las medidas de adaptación, y ninguna cantidad de riqueza, tecnología y experiencia permitiría a los países reducir sustancialmente las pérdidas económicas sufridas. Algunos investigadores han intentado integrar los efectos del cambio climático en modelos de equilibrio general multinacionales. Por ejemplo, Kotlikoff, Polbin y Zubarev (2016) aplican un modelo de generación superpuesta y encuentran que la falta de coordinación intrageneracional o intrapaís hace que la mitigación del cambio climático sea más difícil. Además, el Acuerdo Climático de París puede intensificar inadvertidamente la llamada “paradoja verde”, en la que la adopción de objetivos de emisiones crea incentivos para que los países aumenten su producción de gases de efecto invernadero antes de que las restricciones correspondientes se vuelvan vinculantes.

### **3. Política Fiscal y adaptación al cambio climático**

---

<sup>2</sup> Por ejemplo, el modelo Integrado Dinámico de Clima y Economía (DICE) agrupa a todos los países en una sola economía (Nordhaus 2007, 2008). Por el contrario, el modelo regional integrado de clima y economía (RICE) divide el mundo en áreas que comercian entre sí y pueden actuar de manera cooperativa para hacer frente al cambio climático (Nordhaus y Yang 1996; Nordhaus 2009). Ambos modelos se caracterizan por la presencia de agentes que optimizan el consumo a lo largo del tiempo y deciden la inversión en capital, educación y tecnología. Las revisiones recientes de estos modelos se proporcionan en Nordhaus (2017). Otros modelos se centran en políticas para aumentar el nivel de gasto en investigación y desarrollo (I+D) y conocimiento que permitan cambios tecnológicos para mejorar la eficiencia energética. Se estima que el retorno de la inversión en I + D es cuatro veces mayor que la inversión en capital físico, por lo que debería alentar a la tecnología a avanzar hacia un camino dinámico más respetuoso con el medio ambiente (Bosetti, Carraro y Galeotti 2006).

<sup>3</sup> Para una revisión más completa de la literatura de estos modelos, se puede leer a Vivid Economics (2013).

Las estrategias de adaptación se esfuerzan por contener y gestionar los efectos nocivos del cambio climático. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) define la adaptación como "el proceso de ajuste al clima real o esperado y sus efectos. En los sistemas humanos, la adaptación busca moderar o evitar daños o explotar oportunidades beneficiosas. En algunos sistemas naturales, la intervención humana puede facilitar el ajuste al clima esperado y sus efectos" (IPCC 2001).

Mientras que la mitigación se centra en reducir la gravedad del cambio climático mediante, entre otras cosas, la reducción de las emisiones globales de carbono, la adaptación busca abordar el impacto de un clima cambiante.

La adaptación incluye tanto medidas preventivas, como la inversión en infraestructura diseñada para limitar los daños causados por fenómenos meteorológicos extremos, como medidas correctivas, como el socorro en casos de desastre y la reconstrucción.

El objetivo general de la adaptación es proteger y restaurar el capital dañado por el cambio climático, al tiempo que se acomoda un mayor crecimiento económico y demográfico. Las estimaciones de la necesidad mundial de inversión en adaptación están evolucionando, y los investigadores han identificado la infraestructura y las zonas costeras como las áreas que requieren las intervenciones más costosas<sup>4</sup>.

La asistencia internacional y la inversión privada pueden reducir el costo de la adaptación a nivel nacional. Harris y Roach (2018) encuentran que las estimaciones de costos de adaptación producidas por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) exceden la cantidad anual comprometida por las naciones desarrolladas en el Acuerdo Climático de París de 2015 dos o tres veces, y que habrá una brecha financiera significativa, siendo probable que crezca sustancialmente en las próximas décadas, a menos que se logren progresos significativos para asegurar una financiación nueva, adicional e innovadora para la adaptación.

A pesar de los considerables costos explícitos, invertir en adaptación es vital para limitar el inmenso daño económico causado por el cambio climático y los fenómenos meteorológicos extremos. El PNUD (2007) sostiene que no adaptarse al cambio climático afectaría gravemente el proceso de desarrollo, y los desastres relacionados con el clima ya están afectando seriamente el crecimiento en los estados pequeños (Cabezón et al. 2015).

Tanto el sector público como el privado tienen un papel importante que desempeñar en las estrategias de adaptación. El sector privado es la principal fuente de inversión en capital humano y físico, mientras que el sector público es vital para coordinar las acciones de los agentes individuales en una respuesta colectiva (Mendelsohn 2012).

Barrage (2015) estudia la combinación óptima de políticas entre la mitigación del cambio climático y la adaptación y aboga por la plena provisión pública de políticas e inversiones de adaptación, incluso cuando esas políticas e inversiones se financian a través de impuestos distorsivos. A corto plazo, la adaptación al cambio climático compite con otros objetivos de desarrollo por los escasos recursos fiscales y de ayuda.

Sin embargo, a largo plazo, la adaptación al cambio climático es coherente con el logro de objetivos de desarrollo más amplios y, en algunos casos, es parte integral de su

---

<sup>4</sup> Margulis y Narain (2010) proporcionan una cuantificación de los costos de adaptación.

consecución. Las estrategias de adaptación requieren diversas formas de intervención del sector público. Algunas estrategias se centran en las inversiones públicas en infraestructura diseñadas para aumentar la resiliencia social y económica al cambio climático y los fenómenos meteorológicos extremos.

Otros implican la adopción de políticas que aumenten los precios de los activos públicos (como los recursos hídricos) para promover la conservación y la gestión sostenible alineando su valor individual más estrechamente con su valor social. Las regulaciones se pueden utilizar para ajustar los patrones de actividad humana para reflejar los riesgos relacionados con el clima. Por ejemplo, las regulaciones de zonificación pueden prohibir la construcción en áreas vulnerables a las inundaciones. Por último, los incentivos fiscales pueden alentar la inversión privada en la adaptación.

Para una revisión más detallada de las diversas herramientas de política que se utilizan actualmente para promover la adaptación al cambio climático, se puede leer el artículo de Mechler, Mochizuki y Hochrainer (2016).

#### **4. Modelo económico propuesto para incorporar cambio climático y planificación fiscal a mediano plazo**

Los modelos macroeconómicos pueden arrojar luz sobre el papel fundamental de la política fiscal en el apoyo a la adaptación al cambio climático. A continuación, se propone un modelo de equilibrio general, que puede capturar el impacto del cambio climático estimando su efecto en la tasa de depreciación del capital físico. En este modelo, la adaptación refleja la medida en que las políticas públicas reducen la influencia negativa del cambio climático en la tasa de depreciación del capital<sup>5</sup>.

El modelo describe una pequeña economía abierta que comercia e intercambia capital con el resto del mundo. Los hogares ahorran y suministran mano de obra sobre la base de los precios de los factores determinados por el mercado (es decir, salarios y tasas de interés), que se toman como dadas. Las tasas de crecimiento del PIB se calculan a través de una función de producción que incluye insumos de trabajo, capital físico y capital humano. La productividad total de los factores depende de la intensidad del capital (es decir, del capital por trabajador) y del stock de capital humano. Este último se calcula sobre la base del nivel de educación de la fuerza laboral y su tasa de crecimiento.

El modelo asume que la economía nacional puede endeudarse hasta un límite de crédito determinado, que se establece exógenamente, y que no puede construir una posición negativa neta de activos externos superior al 150 por ciento de su PIB. La tasa de interés aplicada al endeudamiento externo es la misma tasa que prevalece en el mercado internacional y, por lo tanto, el aumento del endeudamiento no implica ninguna prima de riesgo. El modelo asume que el país satisface la restricción presupuestaria intertemporal, y no se permite el incumplimiento. El cambio climático afecta la tasa de depreciación del capital. Se asume que el cambio climático acelera la depreciación del stock de capital a través de dos tipos de efectos: (i) factores graduales, que son manifestaciones del cambio climático que tienen un impacto económico relativamente lento pero progresivamente intensificado, como el desplazamiento de cultivos y el aumento del nivel del mar, y (ii)

---

<sup>5</sup> Una extensión al modelo podría internalizar que el cambio climático también afecte a la acumulación de capital humano, aunque en el presente modelo propuesto, no se lo considere.

eventos extremos, que son fenómenos relacionados con el clima (como tornados y ciclones) que afectan severamente el stock de capital físico en un breve período de tiempo.

El modelo considerado solo supone un tipo de capital, y el capital reemplazado a raíz de un desastre natural es más resistente al clima si el gobierno ha invertido previamente en la adaptación. Además, la reconstrucción después de un evento extremo impulsa el crecimiento al acelerar la acumulación de capital. Se asume que las tendencias climáticas actuales continuarán durante el período de proyección.

Aunque en realidad las tendencias climáticas están sujetas a una incertidumbre significativa, también se asume una "previsión perfecta". En otras palabras, todos los agentes conocen de antemano la evolución de los factores graduales y los eventos extremos.

Se supone que la inversión en bienes de capital está sujeta a costos de ajuste que impiden que el capital se restablezca instantáneamente. La inversión no responderá de inmediato a los shocks que reduzcan el stock de capital, y el costo del ajuste ralentizará la restauración del capital y retrasará sus beneficios económicos. Los costes de ajuste de capital son particularmente relevantes cuando los acontecimientos extremos reducen repentinamente el stock de capital porque la reconstrucción posterior al desastre no puede comenzar de inmediato. El gobierno puede movilizar recursos para invertir en la adaptación al cambio climático. Se asume que la inversión del gobierno en adaptación puede aumentar la resiliencia al reducir la tasa de depreciación agregada del stock de capital<sup>6</sup>. También se supone que este efecto se aplica no sólo al nuevo capital, sino también a todo el stock de capital. Esta suposición no debilita la generalización de los resultados porque la suposición alternativa de que el gasto en adaptación afecta la resiliencia solo del nuevo capital reduciría de manera similar el impacto del cambio climático en la tasa general de depreciación del capital. Debido a que el modelo asume una previsión perfecta, los agentes pueden evaluar con precisión el perfil de depreciación de capital y anticipar el costo económico de reconstruir el stock de capital después de un evento extremo. Los hogares se ajustan a estos costos anticipados aumentando el ahorro privado a expensas del consumo. Sin embargo, los recursos privados internos pueden no cubrir el costo total de la reconstrucción en casos de eventos particularmente extremos relacionados con el clima.

#### *Las principales características del modelo propuesto son*

El modelo describe una pequeña economía abierta: los mercados de bienes y capitales están abiertos con el resto del mundo.

La economía tiene tres sectores centrales: los hogares, las empresas y el gobierno.

La función de producción es un Cobb-Douglas con tres insumos (trabajo, capital físico y capital humano) y con un parámetro para la productividad total de los factores (FTP).

El índice de capital humano se calcula sobre la base del nivel educativo supuesto de la fuerza laboral.

La FTP, endógena, en función de la relación capital-trabajo y del índice de capital humano.

---

<sup>6</sup> Se asume que el gasto público en adaptación reduce permanentemente la tasa de depreciación, lo que implica una relación negativa entre el stock de capital adaptativo y la tasa de depreciación. Esto es consistente con Millner y Dietz (2015), quienes asumen una relación negativa entre el stock de capital adaptativo y la función de daño.

El modelo asume que la evolución del cambio climático es conocida por todos los agentes de antemano (previsión perfecta).

Los agentes ahorran y deciden sobre la oferta de mano de obra sobre la base de los precios de mercado.

El país se enfrenta a una restricción de endeudamiento: puede pedir prestado del extranjero hasta un cierto límite de crédito exógeno en función del PIB.

El impacto del cambio climático se modela como un aumento en la tasa de depreciación del capital físico.

Los eventos climáticos son de dos tipos: (i) factores climáticos graduales, que tienen un impacto económico que se intensifica progresivamente con el tiempo (por ejemplo, aumento del nivel del mar), y (ii) eventos extremos, que tienen un impacto significativo e inmediato en el capital físico (por ejemplo, tornados).

Se consideran dos políticas principales para la intervención pública: (i) aumento de las inversiones públicas para reducir la erosión del capital (adaptación temprana o tardía) y (ii) introducción de impuestos para aumentar el margen fiscal y abordar el impacto de los eventos climáticos extremos.

Se consideran diferentes hipótesis para financiar el aumento del gasto deficitario; aumento de los impuestos sobre el consumo, los ingresos del trabajo y el capital; y reducción del gasto en educación o de las transferencias sociales.

También se considera la intervención de donaciones en caso de fenómenos meteorológicos extremos para financiar la reconstrucción.

#### 4.1 Hogares

Cada cohorte está representada por un hogar que maximiza la utilidad de por vida con descuento al elegir el consumo y el ocio durante el ciclo de vida desde la entrada en el mercado laboral (a la edad más temprana de 15 años) hasta la muerte (101 años).

La utilidad de flujo de ciclo de vida de los hogares está dada por

$$U = \sum_{t=s}^{s+T} q_{t-s} \frac{u[c_{t-s}(e_t - l_{t-s})]^{1-\frac{1}{\xi}}}{1-\frac{1}{\xi}} \frac{1}{(1+\rho)^{t-s}} \quad (1)$$

donde  $T$  es la longevidad (101 años para todos los agentes),  $\rho$  denota la tasa de preferencia temporal que es invariante de cohorte y  $\xi$  define la elasticidad Intertemporal de la sustitución. La variable  $q_{t-s}$  es la tasa de supervivencia a la edad  $t-s$ ,  $c$  denota bienes de consumo, y  $l$  es la oferta de mano de obra individual. La oferta de mano de obra  $l$  se mide en unidades de eficiencia en relación con la dotación de tiempo  $e$ . Los hogares maximizan la utilidad en la ecuación (1) con respecto al consumo y el ocio sujetos a la restricción presupuestaria dinámica:

$$a_{t+1-s} = \frac{1}{q_{t-s}}(1 + r_t)a_{t-s} + (1 - \tau_{l,t})w_{t-s}h_{t-s}l_{t-s} - (1 + \tau_{c,t})c_{t-s} - if_{t-s} + T_{t-s} \quad (2)$$

donde  $a_{t-s}$  denota la riqueza en el momento  $t$  de la cohorte nacida en el período  $s$ ;  $r_t$ ,  $w_{t-s}h_{t-s}l_{t-s}$ ,  $T_{t-s}$  son respectivamente la tasa de interés, los ingresos laborales después de impuestos y las transferencias sociales en el momento  $t$  para la cohorte de edad  $t-s$ . Las variables  $\tau_{l,t}$  y  $\tau_{c,t}$  respectivamente denotan la tasa de contribución fiscal exógena sobre el

trabajo y el consumo, y  $if_t$  es un impuesto de suma global impuesto por el gobierno para reducir la deuda pública como precaución en espera de eventos extremos.

La elección óptima de mano de obra / ocio da la siguiente condición de primer orden:

$$\frac{u_{l,t-s}}{u_{c,t-s}} = \frac{(1-\tau_{l,t})}{(1+\tau_{c,t})} \omega_t h_t \quad (3)$$

La ecuación de Euler para la elección del consumo intertemporal es

$$\frac{u_{c,t+1-s}}{u_{c,t-s}} = \frac{q_{t-s}}{(1+\rho)(1+r_{t+1})} \frac{1+\tau_{c,t-s}}{(1+\tau_{c,t+1-s})} \quad (4)$$

Donde  $u_c$  y  $u_l$  son utilidad marginal del consumo y el ocio.

Finalmente, mostramos la principal agregación para el insumo laboral (5), la riqueza (6), el impuesto de suma global (7) y el gasto en educación pública (8).

$$L_t = \sum_{i \in I} \sum_{s=s_0, i}^{T_r} h_{t-s, i} l_{t-s, i} P_{t-s, i'} \quad (5)$$

$$A_t = \sum_{i \in I} \sum_{s=s_0}^T a_{t-s, i} P_{t-s, i'} \quad (6)$$

$$If_t = \sum_{i \in I} \sum_{s=s_0}^T if_{t-s, i} P_{t-s, i'} \quad (7)$$

$$SC_t = \sum_{i \in I} \sum_{s=s_0}^T SC_{t-s, i} P_{t-s, i'} \quad (8)$$

donde  $s_{0, i}$  es el año en que la cohorte de edad  $t-s$  con nivel de educación  $i$  se emplea;  $P_{t-s, i}$  es la población de edad  $t-s$  en el año  $t$ ;  $T_r$  denota los años de cotización requeridos en el año  $t$  para obtener un beneficio de pensión. La variable  $h_{t-s, i}$  denota el capital humano para el nivel educativo  $i$ . El gasto en educación agregado y per cápita son, respectivamente,  $SC$  y  $sc$ . La ecuación (7) se utiliza para obtener el nivel de tributación invariante de cohorte per cápita  $if_{t-s}$ .

## 4.2 Empresas

El sector productivo se caracteriza por una empresa representativa que utiliza una tecnología Cobb-Douglas con rendimientos crecientes a escala, combinando el stock de capital  $K_t$  con el insumo laboral efectivo  $L_t$ :

$$Y_t = TFP_t K_t^\beta L_t^{1-\beta} \quad (9)$$

donde  $\beta$  es la participación en el capital y  $TFP_t$  la productividad total endógena de los factores.

Los beneficios de la empresa se definen como

$$\pi_t = Y_t - (r_t + \tau_{k,t} + \delta_t)K_t - w_t L_t \quad (10)$$

Donde  $\delta_t$  denota la tasa de depreciación, que se ve afectada endógenamente tanto por el calentamiento global gradual como por los eventos extremos). Las condiciones de primer orden de la maximización de ganancias dan los siguientes salarios y tasas de interés:

$$r_t = TFP_t \beta f'_K - \tau_{k,t} - \delta_t \quad (11)$$

$$w_t = TFP_t (1 - \beta) f'_L \quad (12)$$

Donde  $f'_K$  y  $f'_L$  son la productividad marginal del capital y el trabajo, respectivamente. La economía es tomadora de precios, es decir,  $r_t = r_{w,t}$  donde  $r_w$  denota el resto del mundo. Esto implica que la ecuación (11) se utiliza para determinar la demanda de capital social. Por lo tanto, las empresas forman sus funciones de demanda de capital y trabajo por igual en el marco de rendimientos constantes a escala, mientras que  $TFP_t$  aumenta debido tanto a la relación capital/trabajo como a las externalidades de capital humano por trabajador, de la siguiente manera:

$$TFP_t = \left( \frac{K_t}{N_t} \right)^g H_t^z \quad (13)$$

donde  $g$  y  $z$  denotan la contribución de los factores de producción a la  $TFP_t$ . En particular,  $g$  mide la contribución del capital por trabajador en la creación de tecnología, y  $z$  es la contribución del capital humano.

### 4.3 Gobierno

El sector público consta de sólo tres programas, a saber, seguridad social, educación y adaptación al cambio climático. El gobierno recauda fondos a través de la deuda pública y los impuestos pagados por los hogares (a la tasa exógena del impuesto sobre la renta del trabajo  $\tau_l$ , la tasa del IVA  $\tau_c$ ) y las empresas (a la tasa del impuesto sobre el capital).

Para gestionar la estrategia de adaptación al cambio climático, el gobierno utiliza dos instrumentos: (i) inversión pública  $I^c$  para reducir la erosión del valor del capital debido al cambio climático y (ii) impuesto de suma global  $I_f$  sobre los ingresos de los hogares, con el fin de recaudar fondos que se utilizarán específicamente para reducir la deuda pública en caso de cambio climático extremo. El gobierno utiliza los ingresos para financiar transferencias sociales  $T_t$  a beneficiarios  $\zeta$  mayores de 65 años, educación e inversión pública para la adaptación.

El gobierno emite nueva deuda para financiar el déficit:

$$\Delta B_t = r_t B_t - \tau_{l,t} w_t L_t - \tau_{c,t} C_t - \tau_{k,t} K_t - \Delta RF_t + r_t RF_t + d_t + \zeta T_t + I_t^{CC} + SC_t \quad (14)$$

Donde  $r_t B_t$  denota el pago de intereses de la deuda pública y  $\Delta B_t = B_t - B_{t-1}$  denota el cambio de la deuda pública. Las variables  $\tau_{l,t} w_t L_t$ ,  $\tau_{c,t} C_t$  y  $\tau_{k,t} K_t$  denotan los ingresos del trabajo, el consumo y el capital, respectivamente.  $RF_t$  es la cantidad de ingresos de los

impuestos sobre la renta de los hogares utilizados para construir un fondo de reserva para reducir la deuda pública.  $\zeta_t T_t$  y  $SC_t$  indican respectivamente el gasto en transferencias sociales y el gasto público en educación.  $I_t^{cc}$  denota la inversión pública efectiva para adaptarse al cambio climático, y  $d_t$  denota los recursos adicionales de subvenciones necesarios para adaptarse a un evento extremo. Debido a que se supone que estos recursos se destinan al gasto de adaptación, reducen las necesidades de financiamiento del gobierno y no entran en las restricciones presupuestarias de los hogares y las empresas.

La restricción financiera en el mercado internacional para el país de origen viene dada por

$$F_t < \bar{F}_t \quad (15)$$

donde denota un múltiplo del activo externo neto (NFA) del país en el caso del calentamiento global gradual, sin adaptación. La posición de la NFA del país afectado por el cambio climático viene dada por  $\bar{F}$

$$F_t = A_t - K_t - B_t \quad (16)$$

Con el fin de gestionar futuros eventos extremos y evitar la ocurrencia de restricciones de endeudamiento, el gobierno elige el nivel óptimo de  $I_t$  minimizando la siguiente función de desutilidad:

$$-U = \sum_i \Lambda_{t+i} \left[ \frac{I_{t+i}^{1+\sigma_b}}{1+\sigma_b} - \frac{d_{t+i}^{1-\sigma_d}}{1-\sigma_d} \right] \quad (17)$$

donde los fondos de subvención  $d_t$  reducir la inutilidad asociada con el evento climático con la elasticidad  $\sigma_d$ . El gobierno descuenta el futuro teniendo en cuenta la tasa de descuento

promedio  $\Lambda_t = \frac{q_{t-s}}{1+\rho} \lambda_{t-s}$ . La minimización de la inutilidad está sujeta a la restricción (14) y a lo siguiente:

$$RF_{t+1} = (1 + r_{f,t})RF_t + I_{f,t} \quad (18)$$

$$F_t = A_t - K_t - B_t \quad (19)$$

$$F_t \geq \bar{F}_t \quad (20)$$

$$d_t \leq \bar{d}_t \quad (21)$$

donde  $RF_t$  es el monto de la reducción de la deuda y  $F_t$  es la posición de NFA de la pequeña economía abierta. El fondo de reserva  $RF_t$  se recauda a través de impuestos de suma global. Es un fondo líquido mantenido en forma de numerario bueno. Se supone que se deposita en el extranjero y que recibe una tasa de interés igual a la tasa global libre de riesgo prevaleciente, neto de un diferencial. El  $RF$  del fondo de reserva acumulado se remunera con un tipo de interés  $r_{f,t}$ , que difiere del tipo de interés  $r_t$  que prevalece en los

mercados financieros en un diferencial en función de la desviación del nivel objetivo del fondo de reserva  $\frac{RF_t}{Y_t}$  de la siguiente manera:

$$r_{f,t} = r_t + i \left[ \exp\left(\frac{RF_t}{Y_t} - \frac{R\bar{F}_t}{Y_t}\right) - 1 \right] \quad (22)$$

$F_t \geq \bar{F}_t$  denota una restricción ocasionalmente vinculante en los mercados financieros internacionales. Esto implica que el país no puede endeudarse más allá del umbral  $\bar{F}_t$ . Del mismo modo,  $d_t \leq \bar{d}_t$  denota la restricción en la disponibilidad de subvenciones externas (presupuesto limitado).  $\bar{d}_t$  se establece que es igual a un cierto porcentaje del PIB,  $\bar{d}_t = \alpha idY_t$ . Esto nos permite obtener la política intertemporal óptima para la tributación y las donaciones:

$$If_t^{\sigma_b} = E_t \frac{1}{(1+r_{t+1})} \left[ If_{t+1}^{\sigma_b} (1 + r_{f,t+1}) + \theta_{1,t+1} - \theta_{2,t+1} \right] \quad (23)$$

$$d_t = [\theta_{1,t} + \theta_{2,t}]^{\frac{1}{\sigma_d}} \quad (24)$$

Dónde  $\theta_{1,t}$  y  $\theta_{2,t}$  son los multiplicadores de Lagrange asociados con las restricciones internacionales y de subvención, respectivamente. La ecuación (23) muestra la política óptima dado el valor esperado de la tributación  $If_t$ . Esto depende intertemporalmente del objetivo a largo plazo  $If_t$  que se fija al nivel objetivo arbitrario del PIB. La resolución de la ecuación (23) da recursivamente el flujo de impuestos descontado

$$If_t = E_t \left[ If_t \prod_{j=1}^T \frac{1+r_{f,t+j}}{1+r_{t+j}} + \sum_{k=0}^T \prod_{j=0}^k \left( \frac{1+r_{f,t+k}}{1+r_{t+k}} \right)^j \left( \frac{\theta_{1,t+k+1} - \theta_{2,t+k+1}}{1+r_{t+k+1}} \right)^{\frac{1}{\sigma_b}} \right] \quad (25)$$

La ecuación (24) describe la política óptima intertemporal para la demanda de subvenciones. La ecuación (25) describe la política óptima del fondo de reserva. El ahorro precautorio depende del valor actual esperado del beneficio neto de recibir donaciones externas cuando el país está racionado en el mercado de crédito. Cuando la utilidad marginal de las subvenciones excede la inutilidad de ser racionada, el mecanismo de riesgo moral reduce el incentivo para acumular fondos de ahorro. Se utiliza la ecuación (24) como canal de transmisión intertemporal para anticipar la señal de restricción de préstamo a través de multiplicadores de Lagrange  $\theta_1$  y  $\theta_2$  en la ecuación (23).

Siempre que la restricción en la ecuación (15) es vinculante, es decir, el país no puede obtener todos los recursos financieros necesarios ( $F_t$ ), las subvenciones intervienen.

En particular, cuando (15) es vinculante, de la ecuación (16) obtenemos un nivel vinculante para la deuda pública  $\bar{B}_t$ ; y de la ecuación (14) obtenemos el nivel  $d_t$ :

$$\begin{cases} B_t - \bar{B}_t \wedge \theta_{1,t} = d_t^{-\sigma_d}, \theta_{2,t} = 0, \text{ si } F_t < \bar{F}_t \wedge d_t < \bar{d}_t \\ B_t - \bar{B}_t \wedge \theta_{1,t} = (B_t - \bar{B}_t)^{-\sigma_d}, \theta_{2,t} = \bar{d}_t^{-\sigma_d}, \text{ si } F_t < \bar{F}_t \wedge d_t > \bar{d}_t \end{cases} \quad (26)$$

#### 4.4 Impactos graduales del cambio climático

Se puede suponer que la pequeña economía abierta se enfrenta a tendencias graduales de calentamiento global y eventos extremos. El impacto de estas tendencias/eventos se refleja en un aumento en la tasa de depreciación del capital que, a partir de su valor natural, tiende a aumentar con el tiempo. Las tendencias graduales del calentamiento global definen nuestra línea de base. En este escenario, para adaptarse al cambio climático, el gobierno puede aumentar la inversión pública destinada a limitar el aumento de la tasa de depreciación debido al cambio climático. El proceso gradual de calentamiento global se modela de la siguiente manera:

$$m_t = \rho_{m,t} m_{t-1} + \varepsilon_{m,t}, \rho_{m,t} > 1, \varepsilon_{m,t} > 0 \quad (27)$$

donde  $m_t$  representa todos los factores climáticos relacionados con el aumento de la temperatura global que afectan a la actividad económica. El nivel objetivo de inversión pública para adaptarse a las tendencias graduales del calentamiento global es exógenamente fijado y dado por

$$\bar{I}_t^{cc} = \alpha_{cc} Y_t, \alpha_{cc} = 1\% \quad (28)$$

Se asume que la inversión pública en adaptación es un bien irreversible, es decir, una vez gastada la cantidad total de inversión específica para la mejora de la resiliencia del capital físico al cambio climático, nunca se pierde. Además, para simular los costos de ajuste de capital físico, se asume un cierto grado de persistencia, lo que significa que la inversión real tarda en alcanzar el nivel objetivo. De hecho, el nivel real de inversión  $I_t^{\wedge cc}$  se ajusta gradualmente al objetivo, lo que implica que la inversión corriente residual sea  $I_t^{cc} = \bar{I}_t^{cc} - I_t^{\wedge cc}$ , reproduciendo así el efecto de los costos de ajuste dados por el parámetro de persistencia  $\rho_{cc,t}$ :

$$I_t^{\wedge cc} = \rho_{cc,t} I_{t-1}^{\wedge cc} + (1 - \rho_{cc,t}) \bar{I}_t^{cc} \quad (29)$$

En presencia de tendencias graduales de calentamiento global, se supone que la tasa de depreciación del capital sigue una ecuación logística dinámica.

$$\delta_{t+1}^k(m) = \delta_t^k(m) + a_0 \delta_t^k(m) \frac{\delta_t^k(m) - \delta_t^k(m)}{\delta_t^k(m)} \quad (30)$$

cuya solución utilizada en el modelo es

$$\delta_t^k = \frac{\delta_t^k \delta_0^k}{\delta_0^k + [\delta_t^k - \delta_0^k \exp(-a_0 m_t)]}, \quad (31)$$

lo que permite que la tasa de depreciación  $\delta_t$  oscile entre  $\delta_0$  y  $\delta_t^k = \bar{\delta} - \beta_k \bar{I}^{cc}$  durante el período observado. La variable  $\delta_0$  es la tasa de depreciación natural (condición inicial),  $\bar{\delta}$  depende de la magnitud del cambio climático que se asume como moderado (10 por ciento) o alto (20 por ciento),  $\beta_k$  es un parámetro de resiliencia de adaptación y  $\alpha_0$  es el parámetro de transmisión de daños.

La inversión para la adaptación se financia aumentando gradualmente el déficit público:

$$\Delta B_t = \Delta \bar{B}_t + I_t^{cc,*} \quad (32)$$

donde  $\Delta \bar{B}_t$  es el nivel de déficit de la línea de base. Para equilibrar el presupuesto en la ecuación (14), se ajustan las transferencias públicas.

#### 4.5 Eventos extremos

El evento extremo se define como un desastre que ocurre repentinamente causando un fuerte aumento en la tasa de depreciación del capital contra la línea de base (calentamiento global gradual). Además de los recursos nacionales y el financiamiento del mercado internacional, el país puede utilizar donaciones para hacer frente a los daños causados por estos eventos. Los eventos extremos son importantes no solo para la fuerte caída resultante del PIB y el consumo, sino también para un período prolongado de limitación de la financiación. Cuando la intensidad de los eventos extremos es suficiente para restringir financieramente la economía, las fricciones reales en la recuperación del stock de capital podrían persistir. Cuanto más aguda sea la gravedad, mayor será la probabilidad de estar limitado financieramente y mayores serán los costos esperados de la recuperación de capital. Este bucle causal adverso podría motivar una activación preventiva de la política fiscal para evitar tal no linealidad. Similar al calentamiento global gradual, el evento extremo evoluciona de acuerdo con lo siguiente:

$$m_t^f = \rho_{f,t} m_t^f + \epsilon_{f,t}, \rho_{f,t} < 0.4, \epsilon_{f,t} > 0 \quad (33)$$

La introducción de este evento requiere un cambio en la tasa de depreciación definida en (31) que sea igual a lo siguiente:

$$\delta_t^k = \bar{\delta} - \beta_k \bar{I}_t^{cc} \quad (34)$$

Por lo tanto, la nueva tasa de depreciación del capital viene dada por

$$\delta_t^f = \delta_t + m_t^f \quad (35)$$

La ecuación (35) implica que, cuando ocurre un evento extremo, la tasa de depreciación aumenta incluso más que en la línea de base y conduce a una mayor desaceleración en la recuperación del capital.

#### 4.6 Ecuaciones propuestas para posteriores calibraciones del modelo

Se puede suponer que la dotación de tiempo total “e” crece a la tasa de crecimiento del capital humano  $\dot{h}$ , es decir,  $e_{t+1} = e_t(1 + \dot{h})$  como en Börsch-Supan, Ludwig y Winter (2006).

El capital humano  $H_t$  es exógeno y se calcula como un índice de Törnqvist sobre la base de las proyecciones de población de la ONU. Sólo cuando la adaptación se financia a través de un recorte en el gasto en educación, el capital humano se determina endógenamente de la siguiente manera:

$$H_t = H_{t-1}(1 + g_{h,t}), \quad (36)$$

donde  $g_{h,t}$  es una función del gasto en educación.

Para g y z se puede basar en la estimación de la relación a largo plazo

$$\log \log (TFP) = g \log \left( \frac{K}{N} \right) + z \log (H) + \varepsilon_{tfp} \quad (37)$$

## 5. Implicaciones teóricas del modelo

En el modelo se estudian las estrategias preventivas y correctivas para movilizar recursos fiscales limitados para adaptarse al cambio climático. Ambas estrategias ralentizan la tasa de depreciación de capital "normal", y una mayor inversión en adaptación conduce a una difusión más rápida de la tecnología resistente al clima en todo el stock de capital. El modelo permite simular los efectos de estas estrategias sobre el PIB y la dinámica de la deuda, bajo diferentes estrategias de financiación como la fiscalidad distorsiva, una reducción de otros gastos, o un aumento del déficit. Un alto nivel de deuda pública podría impedir que el país acceda a los mercados internacionales de capital incluso ante un evento extremo, y en esta circunstancia las donaciones de los donantes podrían aliviar las limitaciones financieras.

Si se supone que la inversión pública financiada con déficit puede utilizarse para contener el deterioro del stock de capital; este gasto de adaptación, por tanto, provoca un aumento inicial del stock de deuda. A medida que la tasa de depreciación del capital disminuye en relación con la línea de base, la producción aumenta y la relación deuda/PIB se estabiliza. Las intervenciones tempranas, en lugar de tardías, podrían ser efectivas para reducir el impacto negativo de los factores graduales asociados con el cambio climático. La evolución de la relación deuda/PIB depende de la intensidad del choque climático, pero la intervención temprana siempre es superior a la intervención tardía.

Además, por otra parte, financiar la inversión en adaptación a través de impuestos o recortes de gastos es más eficiente que el financiamiento del déficit. Incluso si los impuestos se incrementan en la cantidad necesaria para dejar sin cambios el saldo presupuestario, el gasto de adaptación financiado con impuestos es más sostenible que el financiamiento del déficit a pesar de su impacto distorsionador. Este resultado se mantendría incluso bajo el fuerte supuesto de que una creciente relación deuda/PIB no aumenta los costos de endeudamiento del gobierno.

La financiación del déficit tiene un efecto menos positivo en el PIB debido al comportamiento del consumo de los hogares, tanto en el caso de factores graduales como de eventos extremos. El aumento de los impuestos (o la reducción del gasto) para financiar la inversión en adaptación deja a los hogares en peor situación. Como resultado, los hogares aumentarían su oferta de mano de obra, impulsando la actividad económica.

Financiar el gasto de adaptación a través de impuestos al consumo, que son menos distorsionadores que los impuestos sobre el trabajo y el capital, tiene menos impactos negativos en el PIB. Aunque los impuestos sobre el capital y el trabajo tienen efectos similares a largo plazo, los impuestos sobre el capital tienen un impacto más positivo a corto plazo en el PIB porque la rigidez asociada con los costos de ajuste de capital limita la medida en que los impuestos sobre el capital más altos reducen la inversión.

Por el contrario, recortar el gasto en educación afecta negativamente al capital humano, deprimiendo la productividad y empujando la tasa de crecimiento del PIB. Además, financiar el gasto de adaptación a través de impuestos sobre el capital tiene implicaciones positivas para la dinámica de la deuda. Los impuestos sobre el capital se asocian consistentemente con las relaciones deuda/PIB más bajas a lo largo de todo el período.

Financiar los gastos de adaptación a través de impuestos al consumo, impuestos laborales y transferencias fiscales reducidas tendría efectos comparables en la dinámica de la deuda. Cada instrumento reduciría los ingresos de los hogares, y los hogares compensarían aumentando la oferta de mano de obra. La principal intuición detrás es que el aumento de los impuestos llama la atención de los agentes económicos sobre la existencia (por lo demás difícil de percibir) del cambio climático. Al aumentar la depreciación del capital, el cambio climático hace que la economía, otras cosas iguales, sea más pobre. Anticipándose a las pérdidas futuras, los agentes económicos ahorrarán, trabajarán e invertirán más, lo que tendrá un impacto positivo en el PIB.

Por último, la financiación del déficit de la adaptación es una estrategia deficiente. El impacto negativo sobre la deuda es predominante y la relación deuda/PIB se estabiliza y mejora solo en el futuro a medida que el crecimiento del PIB supera el crecimiento del stock de deuda.

Además de los factores graduales descritos, el cambio climático aumenta la frecuencia y la gravedad de eventos extremos como huracanes, inundaciones y sequías. Bajo el escenario de referencia, que supone que no hay gasto de adaptación, y el PIB cae sustancialmente después de un evento extremo y luego se recupera lentamente. Este patrón podría reflejar dos especificaciones clave del modelo: (i) calibrar de tal manera que el costo del evento extremo para que el país alcance la restricción de endeudamiento, y (ii) asumir que los costos de ajuste ralentizan la reconstrucción del stock de capital. Incluso si el gasto en adaptación aumenta la resiliencia del stock de capital e impulsa el crecimiento del PIB a largo plazo, el financiamiento necesario para reconstruir el stock de capital después de un evento extremo podría exceder tanto los recursos internos disponibles de un país como su capacidad de endeudamiento externo. Para aliviar la restricción del endeudamiento cuando ocurre un evento extremo, un país tiene muchas opciones: podría avanzar en una reducción de la relación deuda pública/PIB, establecer un fondo de reserva en previsión de eventos extremos o depender de donaciones para financiar parcialmente el proceso de recuperación.

Depender de la financiación del déficit, la reducción ex ante de la deuda/ fondos de reserva o las donaciones de los donantes conduce a resultados similares en términos de crecimiento del PIB, pero resultados muy diferentes en términos de dinámica de la deuda. La trayectoria de crecimiento del PIB es similar en los tres escenarios. La reducción ex ante de la deuda o la acumulación de fondos de reserva tiene un impacto más positivo en la relación deuda/PIB que la financiación del déficit porque un mayor espacio de endeudamiento permite al país restablecer el stock de capital más rápidamente después del evento extremo.

La dependencia de las donaciones tiene poco efecto en la dinámica de la deuda en relación con la base de referencia; debido a que la financiación de los donantes se proporciona solo después de que ha ocurrido un evento extremo, el PIB se recupera más lentamente que en los casos en que el gobierno invirtió temprano en aumentar la resiliencia climática del stock de capital. Es probable que una estrategia que combine el gasto en adaptación y la reducción ex ante de la deuda logre restablecer el crecimiento del PIB y la sostenibilidad de la deuda.

La disponibilidad adicional de fondos de donaciones permite al país restablecer su stock de capital más rápidamente y salir de la recesión con un mayor nivel de PIB, pero esta diferencia podría ser modesta. El impacto de las donaciones se ve empujado por el impacto mucho mayor de la inversión en adaptación temprana, que aumenta la resiliencia del stock de capital, y la reducción ex ante de la deuda, que permite al país utilizar plenamente los mercados internacionales de capital.

Financiar la inversión a través de aumentos de impuestos o recortes de gastos parece ser más efectivo que el financiamiento del déficit. Todo escenario de financiación alternativo da lugar a una menor relación deuda/PIB y a un mayor nivel del PIB final, con la excepción de los recortes del gasto en educación, ya que esos recortes tienen un efecto negativo en la formación de capital humano. Los mecanismos de financiación distintos del gasto deficitario (o los recortes al gasto en educación) ofrecen ventajas aún mayores en el caso de eventos extremos que en el caso de factores graduales.

Hacer frente a los eventos extremos requiere una gran cantidad de financiamiento en un corto período de tiempo, lo que hace que el país alcance su límite de endeudamiento en el mercado de capitales. Financiar el gasto en adaptación a través de impuestos o recortes de gastos en otras áreas reduce la necesidad de endeudamiento externo y, según cuál sea la calibración del modelo, permitiría que el país se mantenga dentro de su límite de endeudamiento. Además, el endeudamiento externo puede ser más costoso de lo que se ha supuesto, lo que subraya aún más la superioridad de los impuestos o los recortes del gasto sobre el financiamiento del déficit. Como se señaló anteriormente, este modelo no incluye ninguna prima de riesgo, y los costos de endeudamiento son independientes del nivel de deuda. Sin embargo, esto puede ser una simplificación excesiva, porque en el mundo real muchos países han experimentado incumplimientos soberanos. Además, el modelo incluye un solo bien homogéneo que se negocia en función del saldo ahorro-inversión, lo que implica que no hay fluctuaciones nominales del tipo de cambio ni posibilidad de crisis cambiarias. Debido a la ausencia de primas de riesgo y a la fluctuación de los tipos de cambio, el endeudamiento externo en nuestro modelo es probablemente más seguro y menos costoso que en el mundo real. Los resultados del modelo resaltan la importancia de invertir en la adaptación al cambio climático antes de que ocurra un evento extremo. Aunque mantener un nivel de deuda bajo o ahorrar activos en un fondo de reserva facilitaría la reconstrucción posterior al desastre, estas medidas no harían nada para fortalecer la resiliencia del stock de capital ex ante. Sin embargo, si un país invierte en adaptación antes de un evento extremo, su stock de capital se vuelve más resistente a los efectos del cambio climático, y la tasa de depreciación después del evento es más baja de lo que sería de otra manera. Los costos de ajuste de capital ralentizan la reconstrucción, incluso dados los abundantes recursos fiscales, y cuanto menos reconstrucción es necesaria, más rápido se recupera la economía.

Por último, es importante reiterar que todas estas implicaciones potenciales teóricas se deberían probar mediante calibraciones del modelo teórico propuesto.

## **6. Conclusión**

Los países de todo el mundo han logrado avances limitados y desiguales en la incorporación de cuestiones relacionadas con el clima en sus marcos de política macroeconómica. Las políticas de adaptación, especialmente las acciones preventivas de gasto, a menudo se enfrentan a prioridades contrapuestas, incluidos los objetivos de desarrollo social y económico, así como el imperativo de mantener una dinámica fiscal y de deuda saludable. Los países más pequeños y menos desarrollados pueden suponer que carecen de los recursos y la capacidad necesarios para adaptarse al cambio climático, y en su lugar pueden optar por depender de la asistencia de las donaciones a raíz de los fenómenos extremos. Las donaciones, a su vez, pueden reforzar esta tendencia centrándose en las medidas correctivas, como la respuesta a los desastres y la recuperación, en lugar de las medidas preventivas. Además, los países que adoptan políticas de mitigación (como los Acuerdos Climáticos de París) pueden estar sujetos a un riesgo moral: los responsables de la formulación de políticas pueden asumir, incorrectamente, que los esfuerzos globales de mitigación abordarán eficazmente el problema del cambio climático y se inclinarán menos a invertir en adaptación.

La evidencia disponible indica un claro sesgo a favor de la acción correctiva sobre la acción preventiva. Los países tienden a estabilizar los ingresos presupuestarios, por ejemplo, movilizándolo los ingresos fiscales, solo después de experimentar los efectos del cambio climático, en lugar de ahorrar ingresos por adelantado (Gerling 2017). Es muy probable que los gobiernos se centren en medidas correctivas si sus políticas fiscales ya son procíclicas.

Aunque la mayoría de los gobiernos hacen provisiones presupuestarias para eventos imprevisibles, algunos incluso diseñados específicamente para responder a desastres naturales, los recursos proporcionados a menudo son insuficientes para hacer frente a los costos exorbitantes del cambio climático.

Mejorar la resiliencia al cambio climático requiere una estrategia multifacética que incluya medidas preventivas y correctivas. La acción preventiva puede apoyar una trayectoria de crecimiento a largo plazo más alta y una mayor estabilidad macroeconómica al reducir las pérdidas de producción y bienestar asociadas con el cambio climático.

El gasto preventivo debe ser proporcional al stock de capital de cada país; por lo tanto, no debería ser más oneroso para los países más pequeños que para los más grandes. Las medidas preventivas incluyen tanto inversiones en infraestructura física como la creación de “colchones” de políticas diseñados para aumentar la resiliencia a las perturbaciones y aliviar las restricciones de endeudamiento, incluidos niveles de deuda más bajos, saldos fiscales más sólidos y mayores reservas. Sería importante incorporar el gasto en adaptación en la planificación fiscal. La gestión de las finanzas públicas, el presupuesto y el gasto debe utilizarse para informar mejor las decisiones de gasto. La presentación de informes sobre el clima en las asignaciones presupuestarias y las herramientas para incorporar las cuestiones climáticas en la planificación nacional del desarrollo son prácticas que deben seguir desarrollándose. Ampliar el uso de mecanismos supranacionales de riesgos podría fortalecer la resiliencia fiscal y acelerar la reconstrucción posterior al desastre. Estos mecanismos incluyen sistemas de seguros privados o soberanos, redes de seguridad

multilaterales y bonos de catástrofe regionales. Hasta ahora, la participación en estos mecanismos, y los desembolsos en el marco de ellos, han sido limitados.

Este artículo contribuye a la literatura naciente sobre política fiscal y adaptación al cambio climático. Se propuso un modelo macroeconómico estándar para analizar la efectividad de diversas estrategias de ingresos y gastos para abordar tanto los factores graduales asociados con el cambio climático como el impacto de los eventos extremos relacionados con el clima. El escenario de referencia del modelo asume que, si no se toman medidas para adaptarse a su impacto, el cambio climático reducirá sustancialmente el PIB, ampliará los déficits fiscales y aumentará las existencias de deuda. El hallazgo clave es que la acción temprana y preventiva para abordar el cambio climático siempre es superior a la acción correctiva tardía. Esperar para actuar simplemente significa que se necesitarán ajustes más grandes y costosos en el futuro. Aumentar el gasto en adaptación temprano, antes de que los factores graduales hayan erosionado el stock de capital y antes de que los eventos extremos lo hayan dañado aún más, puede aumentar la resiliencia fiscal y económica, reduciendo la necesidad de gasto futuro. La acción temprana es necesaria, pero no suficiente, para gestionar los eventos extremos asociados con el cambio climático.

Los países pequeños que se enfrentan a desastres naturales recurrentes pueden suponer que invertir en la adaptación es inútil porque la escala y la frecuencia de los fenómenos extremos requieren inversiones mucho mayores de las que podrían financiar de manera realista. Estos países podrían combinar el gasto público en adaptación con la reducción de la deuda pública (o la acumulación de ahorros en un fondo de reserva). Invertir en adaptación aumenta la resiliencia del stock de capital, mientras que contener o reducir la carga de la deuda mejora la sostenibilidad financiera y alivia las futuras restricciones de endeudamiento.

En la actualidad, tanto los encargados de formular políticas nacionales como la comunidad internacional han tendido a centrarse en las medidas correctivas por encima de las medidas preventivas. Debido a las restricciones fiscales y las prioridades en competencia, los países tienden a invertir poco en la adaptación al cambio climático o a construir suficientes amortiguadores fiscales para prepararse para eventos extremos. Todavía no se ha llegado a un consenso sobre las mejores prácticas para la acción preventiva, y esta incertidumbre agrava los incentivos para retrasar la inversión en adaptación. El riesgo moral y la dependencia excesiva de la asistencia internacional fomentan aún más las medidas correctivas por encima de las medidas preventivas. Sin embargo, a medida que el impacto social y económico del calentamiento global continúa creciendo, es probable que un mayor retraso requiera intervenciones mucho más extensas y costosas en el futuro, reduciendo el crecimiento a largo plazo y desestabilizando los equilibrios fiscales.

## **7. Referencias**

Ackerman F, DeCanio SJ, Howarth RB, Sheeran K (2009) Limitations of integrated assessment models of climate change[J]. *Clim Change* 95(3–4):297–315

Bahn O, Drouet L, Edwards NR et al (2006) The coupling of optimal economic growth and climate dynamics[J]. *Clim Change* 79(1–2):103–119

Barrage, Lint. 2015. "Climate Change Adaptation vs. Mitigation: A Fiscal Perspective." Working Paper, July 23.

Basingstoke, U.K.: Palgrave MacMillan. Vivid Economics. 2013. "The Macroeconomics of Climate Change." *Report prepared for Defra*, May.

Bonen A., P. Loungani, W. Semmler, and S. Koch (2016). "Investing to Mitigate and Adapt to Climate Change; A Framework Model." *IMF Working Paper 16/164*, International Monetary Fund, Washington, DC.

Bonen A., W. Semmler, and S. Klasen. 2014. "Economic Damages from Climate Change: A Review of Modeling Approaches." *SCEPA Working Paper Series*, Schwartz Center for Economic Policy Analysis (SCEPA), The New School.

Börsch-Supan Axel, Alexander Ludwig, and Joachim Winter. 2006. "Ageing, Pension Reform and Capital Flows: A Multi-country Simulation Model." *Economica* 73 (292): 625–58.

Bosetti V, Carraro C, Galeotti M et al (2006) WITCH: a world induced technical change hybrid model. *Energy J Spec Issue Hybrid Model Energy Environ Polic Reconcil Bottom-up Top-down*:13–38

Bosetti, V., C. Carraro, and M. Galeotti. 2006. "The Dynamics of Carbon and Energy Intensity in a Model of Endogenous Technical Change." *Energy Journal, Endogenous Technological Changes and the Economics of Atmospheric Stabilization Special Issue*.

Bruckner T, Hooss G, Füssel HM, Hasselmann K (2003) Climate system modeling in the framework of the tolerable windows approach: the ICLIPS climate model[J]. *Clim Change* 56 (1–2):119–137

Burke M., S. M. Hsiang, and E. Miguel. 2015. "Global Non-linear Effect of Temperature on Economic Production." *Nature* 527 (November): 235–39.

Cabazon E., L. Hunter, P. Tumbarello, K. Washimi, and Y. Wu. 2015. "Enhancing Macroeconomic Resilience to Natural Disasters and Climate Change in the Small States of the Pacific." *IMF Working Paper 15/125*, International Monetary Fund, Washington, DC.

Catalano, Michele, and Emilia Pezzolla. 2016. "The Effects of Education and Aging in an OLG Model: Long-Run growth in France, Germany and Italy." *Empirica* 43 (4): 757–800.

Douven R, Peeters M (1998) GDP-spillovers in multi-country models[J]. *Econ Model* 15(2): 163–195

Fisher, Lynn M., and Austin J. Jaffe. "Determinants of International Home Ownership Rates." *Housing Finance International* 18 (2003): 34–42.

Fishman, Charles. "The System That Actually Worked." *Atlantic*, May 6, 2020.

Fisman, Raymond, and Yongxiang Wang. "The Mortality Cost of Political Connections." *Review of Economic Studies* 82 (2015): 1346–82.

Flavelle, Christopher, and Brad Plumer. "California Bans Insurers from Dropping Policies Made Riskier by Climate Change." *New York Times*, December 5, 2019.

Flavelle, Christopher, and Nadja Popovich. "Heat Deaths Jump in Southwest United States, Puzzling Officials." *New York Times*, August 26, 2019.

Flavelle, Christopher. "Almost 2 Million Homes Are at Risk from Dorian; Most Lack Flood Insurance." *New York Times*, September 6, 2019.

Flint, Anthony. "The Riches of Resilience." Lincoln Institute of Land Policy, January 13, 2020. <https://www.lincolninst.edu/publications/articles/2020-01-riches-resilience-cities-investing-green-infrastructure-should-developers-foot-bill>.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. "Farmer Field School Approach." [www.fao.org/agriculture/ippm/programme/ffs-approach/en/](http://www.fao.org/agriculture/ippm/programme/ffs-approach/en/).

Footo, Christopher L., Kristopher Gerardi, and Paul S. Willen. "Negative Equity and Foreclosure: Theory and Evidence." *Journal of Urban Economics* 64 (2008): 234–45.

Formetta, Giuseppe, and Luc Feyen. "Empirical Evidence of Declining Global Vulnerability to Climate-Related Hazards." *Global Environmental Change* 57 (2019): 101920.

Fowlie, Meredith, Christopher R. Knittel, and Catherine Wolfram. "Sacred Cars? Cost-Effective Regulation of Stationary and Nonstationary Pollution Sources." *American Economic Journal: Economic Policy* 4 (2012): 98–126.

Fowlie, Meredith, et al. "Default Effects and Follow-On Behavior: Evidence from an Electricity Pricing Program." NBER Working Paper No. 23553, June 2017.

Fox, Karyn M., et al. "Climate Change Adaptation in Ethiopia: Developing a Method to Assess Program Options." In *Resilience: The Science of Adaptation to Climate Change*, ed. Zinta Zommers and Keith Alverson, 253–65. Amsterdam: Elsevier, 2018.

Frank, Lawrence D., Martin A. Andresen, and Thomas L. Schmid. "Obesity Relationships with Community Design, Physical Activity, and Time Spent in Cars." *American Journal of Preventive Medicine* 27 (2004): 87–96.

Frank, Robert H., and Philip J. Cook. *The Winner-Take-All Society: Why the Few at the Top Get So Much More Than the Rest of Us*. New York: Random House, 2010.

Friedman, Milton. *Capitalism and Freedom*. Chicago: University of Chicago Press, 2009.

Gabaix, Xavier. "The Granular Origins of Aggregate Fluctuations." *Econometrica* 79 (2011): 733–72.

Gerling, Kerstin. 2017. "The Macro-Fiscal Aftermath of Weather-Related Disasters: Do Loss Dimensions Matter?" *IMF Working Paper* 17/235, International Monetary Fund, Washington, DC.

Goodess C, Hanson C, Hulme M, Osborn T (2003) Representing climate and extreme weather events in integrated assessment models: a review of existing methods and options for development. *Integr Assess* 4:145–171

Guerson, Alejandro, Saji Thomas, Wayne Mitchell, and Ke Wang. 2016. "Dominica: Selected Issues." *IMF Country Report No. 16/245*, International Monetary Fund, Washington, DC.

- Harris, J. M., and B. Roach. 2018. *Environmental and Natural Resource Economics: A Contemporary Approach*, Fourth Edition. New York: Routledge.
- IMF (International Monetary Fund). 2016a. "Small States' Resilience to Natural Disasters and Climate Change—Role for the IMF."
- IMF 2016b: Solomon Islands: 2016 Article IV Consultation and Fifth and Sixth Reviews Under the Extended Credit Facility Arrangement-Press Release; Staff Report; and Statement by the Executive Director for Solomon Islands, March.
- IMF Policy Paper, International Monetary Fund, Washington, DC.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Fourth Volume of the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kahn, Matthew E., and Daxuan Zhao. "The Impact of Climate Change Skepticism on Adaptation in a Market Economy." *Research in Economics* 72 (2018): 251–62.
- Kahn, Matthew E., and Frank A. Wolak. "Using Information to Improve the Effectiveness of Nonlinear Pricing: Evidence from a Field Experiment." California Air Resources Board, Research Division, March 2013.
- Kahn, Matthew E., and Siqi Zheng. *Blue Skies over Beijing: Economic Growth and the Environment in China*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2016.
- Kahn, Matthew E., et al. "Long-Term Macroeconomic Effects of Climate Change: A Cross-Country Analysis." IMF Working Papers, October 2019.
- Kang, Min, et al. "Using Google Trends for Influenza Surveillance in South China." *PloS One* 8 (2013): e55205.
- KB Home. "Energy Efficient Homes." <https://www.kbhome.com/energy-efficient-homes>.
- Keith, David W. "Geoengineering." *Nature* 409 (2001): 420.
- Kennedy, Chad. "Restoring Power after a Natural Disaster: How to Plan for the Worst." Plant Services, July 11, 2017. <https://www.plantservices.com/articles/2017/es-restoring-power-after-a-natural-disaster/>.
- Kinnan, Cynthia, Shing-Yi Wang, and Yongxiang Wang. 2018. "Access to Migration for Rural Households." *American Economic Journal: Applied Economics* 10 (2018): 79–119.
- Kirwan, Barrett E., and Michael J. Roberts. "Who Really Benefits from Agricultural Subsidies? Evidence from Field-Level Data." *American Journal of Agricultural Economics* 98 (2016): 1095–113.
- Kishore, Nishant, et al. "Mortality in Puerto Rico after Hurricane Maria." *New England Journal of Medicine* 379 (2018): 162–70.
- Kotlikoff L. J., A. Polbin, and A. Zubarev. 2016. "Will the Paris Accord Accelerate Climate Change?" *NBER Working Paper* 22731, National Bureau of Economic Research, Cambridge, MA.

Margulis, Sergio, and Urvashi Narain. 2010. "The Costs to Developing Countries of Adapting to Climate Change: New Methods and Estimates—The Global Report of the Economics of Adaptation to Climate Change Study." *Working Paper 55726*, World Bank, Washington, DC.

Mechler, R., J. Mochizuki, and S. Hochrainer. 2016. "Disaster Risk Management and Fiscal Policy: Narratives, Tools, and Evidence Associated with Assessing Fiscal Risk and Building Resilience." *Policy Research Working Paper 7635*, World Bank, Washington, DC.

Mendelsohn, R. 2012. "The Economics of Adaptation to Climate Change in Developing Countries." *Climate Change Economics* 3 (2): 1250006 (21 pages).

Nordhaus, W. D. 2007. "The Challenge of Global Warming: Economic Models and Environmental Policy." *Working Paper*.  
[http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/OldWebFiles/DICEGAMS/dice\\_mss\\_072407\\_all.pdf](http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/OldWebFiles/DICEGAMS/dice_mss_072407_all.pdf). ———.

2008. *A Question of Balance: Weighting the Options on Global Warming Policies*. New Haven: Yale University Press. ———.

2009. "New Estimates of Efficient Approaches to the Control of Global Warming." *Cowles Foundation Discussion Paper 1716*, Yale University, August. ———.

2017. "Evolution of Modeling of the Economics of Global Warming: Changes in the DICE Model, 1992 – 2017." *Cowles Foundation Discussion Paper No. 2084*, Cowles Foundation Yale University.

Nordhaus, W. D., and Z. Yang. 1996. "A Regional Dynamic General-Equilibrium Model of Alternative Climate Change Strategies." *American Economic Review* 86 (4): 741–65.

Stern, N. 2007. *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge: Cambridge University Press.

UNDP (United Nations Development Programme). 2007. Human Development Report 2007/08.

World Bank Group. 2017. *Climate Change Public Expenditure and Institutional Review Sourcebook*. Washington, DC: World Bank Group.