

# Previsión de impactos climáticos mundiales y regionales, riesgos e implicaciones políticas

por el Programa conjunto de ciencias y políticas del cambio global, del Instituto tecnológico de Massachusetts (MIT)



¿Cuál sería la eficacia y el coste de una política para mitigar el cambio climático causado por el ser humano? ¿Qué ventajas y riesgos conlleva el esperar a una mejor comprensión por parte de la ciencia? ¿Qué naciones, regiones y sectores económicos afrontan los mayores riesgos ante un cambio mundial no controlado?, y ¿podemos reducir sustancialmente esos riesgos a través de la adaptación o de la mitigación?

Las decisiones tomadas ante esta clase de preguntas se reducen al final a una cuestión de riesgos. Las instancias normativas, las partes interesadas y los dirigentes locales confían cada vez más en que la información científica sobre el clima les ayude a responder a estas preguntas. El Modelo de sistema mundial integrado (IGSM) del MIT es primordial en este esfuerzo para prever las posibles consecuencias sociales, económicas y medioambientales del cambio climático.

El IGSM aúna los sistemas humano, natural y de gestión de nuestro entorno global. Este enfoque "integrado" es crucial, ya que a menudo no podemos medir directamente el impacto del desarrollo humano sobre el medio ambiente. Por tanto, debemos formular modelos informáticos combinados de los sistemas natural y humano, comparar estos modelos con observaciones, y luego aplicar los modelos en "experimentos numéricos" que evalúen la influencia de la actividad humana sobre el sistema terrestre y la manera en que, a su vez, la respuesta de dicho sistema afecta a los sistemas humanos<sup>1</sup>.

El esquema del IGSM ha sido desarrollado y perfeccionado por el Programa conjunto de ciencias y políticas del cambio global desde comienzos de la década de 1990. Actualmente se está aplicando en los países desarrollados, así como en países en vías de desarrollo, a través de nuestro trabajo con el Instituto mundial de investigaciones de economía del desarrollo, de la Universidad de las Naciones Unidas. Desde el Zambeze

(África) hasta el estado de Colorado en Estados Unidos de América, sus puntos de vista ayudan a las naciones, a los sectores y a las comunidades a aprender cómo crecer más eficazmente y adaptarse a desafíos vitales presentes y futuros, tales como la gestión del agua y los recursos energéticos<sup>2</sup>.

## Evaluación integrada: dos componentes

El IGSM es un "marco" de submodelos conectados de complejidad variable. Dependiendo de los temas y de cuestiones concretas relacionados con la investigación, los usuarios pueden elegir el submodelo que van a usar y añadirle, cuando sea necesario<sup>3</sup>, ciertos niveles de complejidad.

Los dos componentes principales son:

1. El modelo de predicción de emisiones y análisis de políticas (EPPA), que analiza la actividad humana en su interacción con los procesos climáticos y evalúa las medidas políticas propuestas.
2. Un modelo del sistema Tierra que une la atmósfera química y dinámica, el océano, y los modelos naturales de intercambio biogeofísico y biogeoquímico dentro de un marco de sistema terrestre global. Analiza las interacciones y retroalimentaciones de la biosfera terrestre.

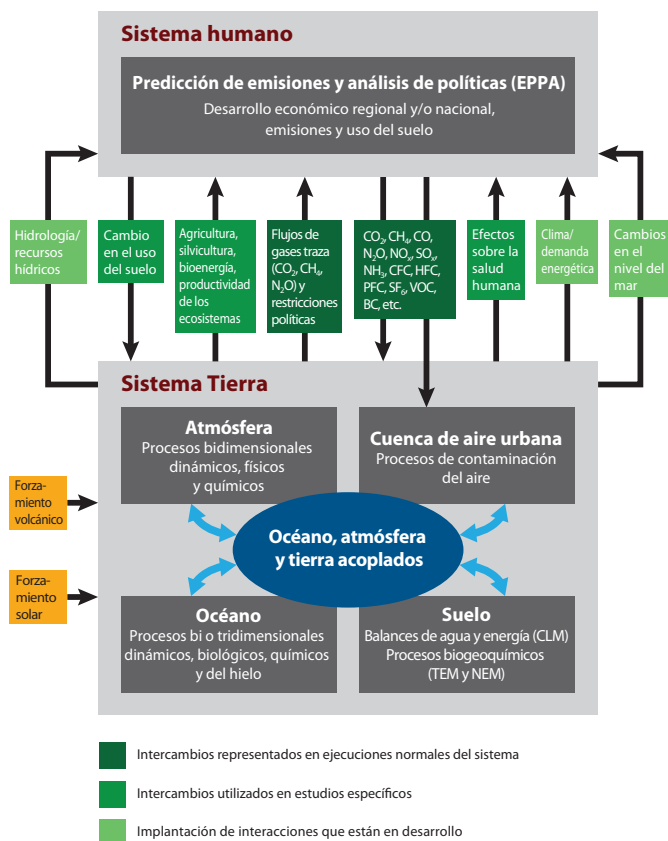
## Economía, emisiones y análisis de políticas

El modelo EPPA es un modelo de equilibrio general computable (CGE) multisectorial y plurirregional de la economía mundial. Proporciona previsiones mundiales

<sup>1</sup> Prinn, R. G., 2012: Development and application of Earth system models. Proceedings of the National Academy of Sciences, doi: 10.1073/pnas.1107470109.

<sup>2</sup> Arndt, C., P. Chinowsky, K. Strzepek, F. Tarp y J. Thurlow, 2012: Economic Development under Climate Change. Review of Development Economics, número especial: Climate Change and Economic Development, 16(3): 369-377.

<sup>3</sup> Sokolov, A. P., P. H. Stone, C. E. Forest, R. Prinn, M. C. Sarofim, M. Webster, S. Paltsev y C. A. Schlosser, 2009: Probabilistic Forecast for Twenty-First-Century Climate Based on Uncertainties in Emissions (Without Policy) and Climate Parameters. J. Climate, 22(19): 5175-5204.



de desarrollo económico y de emisiones, así como análisis de las medidas propuestas para el control de emisiones. Se emplea para analizar los procesos que generan emisiones y para evaluar las consecuencias de las propuestas políticas, ofreciendo estimaciones de la magnitud y de la distribución de sus costes entre las naciones y poniendo en claro la manera de introducir cambios mediante el comercio internacional.

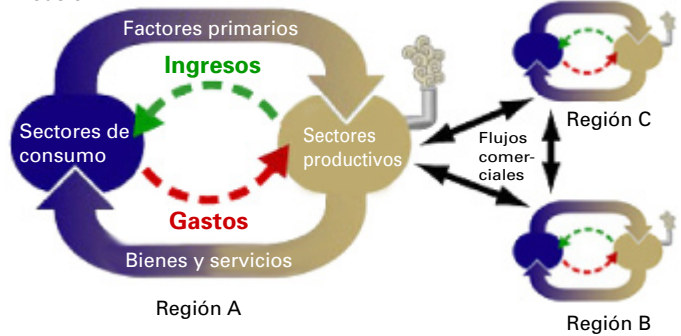
El EPPA utiliza el conjunto de datos del Proyecto de análisis del comercio mundial (que mantiene la Universidad Purdue), ampliado con datos sobre emisiones de gases de efecto invernadero, aerosoles y otras especies relevantes, así como tasas y detalles de sectores económicos seleccionados<sup>4</sup>.

El modelo prevé variables económicas (PIB, uso energético, producción por sectores, consumo, etc.) y emisiones de gases de efecto invernadero ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , HFC, PFC y  $\text{SF}_6$ ) y otros contaminantes atmosféricos ( $\text{CO}$ ,  $\text{COV}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , carbono negro y carbono orgánico) procedentes de la combustión de combustibles fósiles, procesos industriales, tratamiento de residuos y actividades agrícolas. Se han formulado también versiones diferentes del modelo para estudios específicos orientados a facilitar un tratamiento coherente de las respuestas del cambio climático en la economía, tales como los efectos en la agricultura, la silvicultura, los biocombustibles y los ecosistemas, y

<sup>4</sup> Paltsev, S., J. M. Reilly, H. D. Jacoby, R. S. Eckaus, J. McFarland, M. Sarofim, M. Asadoorian y M. Babiker, 2005: The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: Versión 4, MIT JPSG Report 125, August, 72 p.

## Modelo de predicción de emisiones y análisis de políticas del MIT

### Modelo EPPA



### Características del modelo:

- Todos los gases relevantes de efecto invernadero
- Regiones flexibles
- Sectores productivos flexibles
- Sectores energéticos en detalle
- Coste de las políticas sobre el bienestar

### Políticas de mitigación:

- Límites de las emisiones
- Impuestos sobre el carbono
- Impuestos sobre la energía
- Permisos negociables
- Regulación de las tecnologías

de las interacciones con la contaminación atmosférica urbana y sus efectos sobre la salud.

## Modelo del sistema Tierra

Empleamos un modelo del sistema Tierra eficaz y flexible, con una jerarquía de complejidades, para facilitar la investigación de retroalimentaciones e incertidumbres entre los componentes del modelo así como con los agentes humanos y los objetivos de mitigación. El modelo combina varios submodelos: química de la atmósfera, dinámica de la atmósfera, dinámica oceánica, biogeoquímica oceánica y ecosistemas terrestres. Estos componentes del modelo se mantienen lo más próximos posible a los acoplamientos más vanguardistas, combinando diversas configuraciones al tiempo que se mantiene la eficiencia computacional, y facilitando los ensayos exhaustivos de los fenómenos citados. En una de estas configuraciones se combinan modelos de dinámica atmosférica y química, de termodinámica de los hielos marinos, de ecosistemas y de biogeoquímica terrestres y un océano de capa mixta, que representan los procesos de calor y absorción de carbono combinados. Esta configuración es el modelo del sistema Tierra más computacionalmente eficiente del MIT, y nos permite explorar las incertidumbres del clima mediante miles de simulaciones. En otra configuración, empleamos un modelo tridimensional (3D) de la circulación oceánica, de la biología marina y de los procesos químicos que controlan el ciclo biogeoquímico del carbono, los nutrientes y la alcalinidad. En las dos configuraciones citadas, el componente del sistema Tierra incluye también un módulo de química atmosférica interactiva, así como un componente de química del aire urbano.

Los cambios en los ecosistemas terrestres debidos al cambio climático tienen una importancia considerable en los debates políticos. Además, los cambios inducidos por el clima en la biosfera terrestre afectan a la dinámica

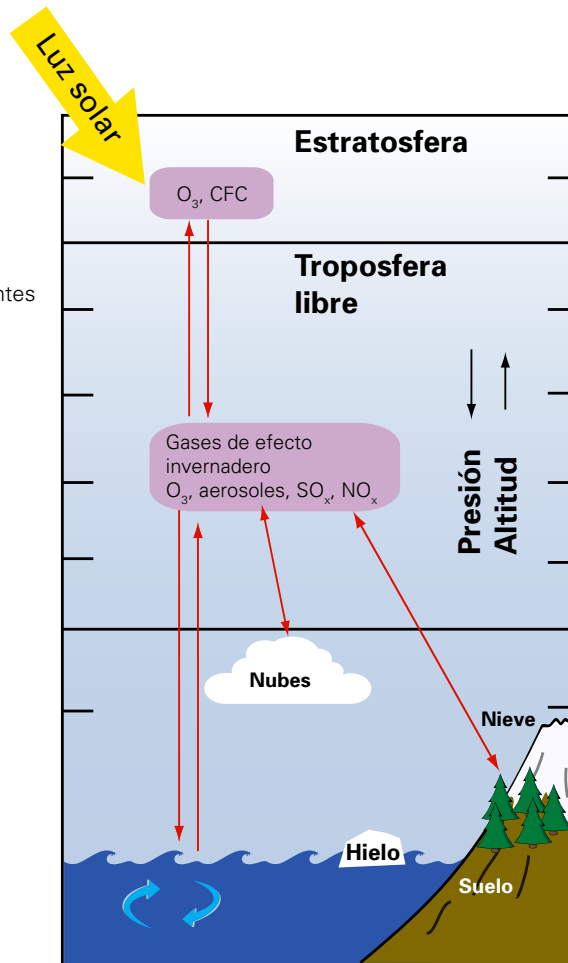
## Modelo climático y químico del MIT

### Salidas del modelo

Temperatura  
 Nubosidad  
 Humedad  
 Depósito de nutrientes  
 Niveles de gases de efecto invernadero y de contaminantes atmosféricos  
 Nivel del mar  
 .....



Para fines de investigación, el modelo divide el globo en 46 regiones cuya latitud mide 4 grados cada una



### Química atmosférica:

25 especies químicas,  
 53 reacciones en fase gaseosa y aerosol

### Intervalos de tiempo:

Advección = 10 minutos  
 Física = 1 hora  
 Fotoquímica = 3 horas

### Circulación atmosférica:

Ecuaciones básicas  
 Intervalo de tiempo = 10 minutos  
 Coordenadas sigma (vertical)  
 Coordenadas esféricas (horizontal)

### Circulación oceánica:

Transporte parametrizado horizontal y vertical en la versión simple, transportes pronosticados en 3D en la versión avanzada.

climática a través de retroalimentaciones tanto en el ciclo del carbono como en las emisiones naturales de gases traza. El componente terrestre del IGSM incluye los modelos hidrológico y ecológico en el marco de un sistema terrestre global. Los procesos hidrológicos y los flujos de calor en la superficie están representados por el modelo terrestre comunitario (CLM), que está basado en una colaboración multiinstitucional de modelos terrestres. Dentro del IGSM, el CLM está ligado dinámicamente al modelo de los ecosistemas terrestres (TEM), desarrollado por el Centro de los ecosistemas del Laboratorio de biología marina.

El TEM se utiliza para simular la dinámica del carbono de los ecosistemas terrestres. Nutriéndose de las aportaciones dinámicas tanto del TEM como del CLM, el modelo de emisiones naturales (NEM) toma en consideración el intercambio de metano y nitrógeno. El sistema modelo acoplado CLM/TEM/NEM representa la distribución geográfica de la cobertura terrestre mundial y la diversidad vegetal por medio de un enfoque a base de mosaicos donde se tienen en cuenta todos los tipos principales de cubierta terrestre y todos los tipos funcionales de plantas de un dominio dado, y su área es ponderada para obtener flujos y almacenamientos totales.

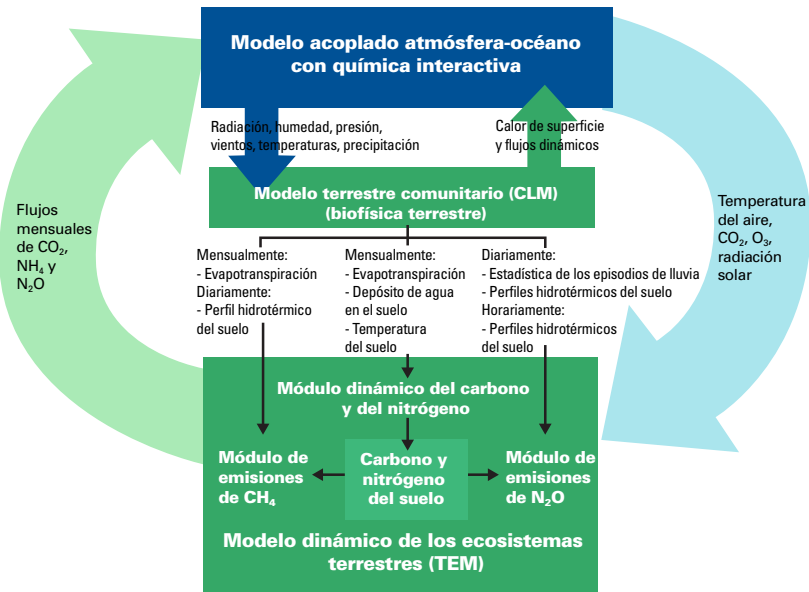
## Cómo sopesar la incertidumbre

En el marco del IGSM tiene una importancia crucial la incorporación de la incertidumbre para estimar los factores humanos clave, tales como el crecimiento poblacional y la actividad económica, el ritmo y dirección de los avances técnicos, así como la respuesta del sistema Tierra a esas influencias humanas.

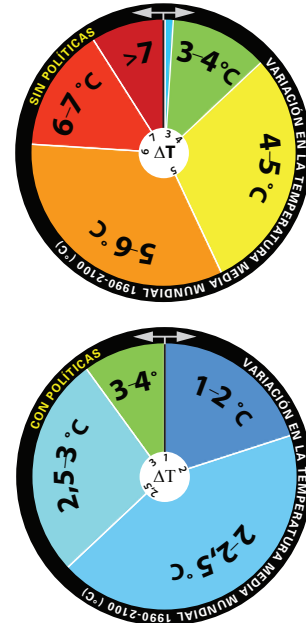
Para investigar las retroalimentaciones e incertidumbres entre los componentes del modelo así como con los factores humanos y los objetivos de mitigación, se emplea la configuración de complejidad intermedia más eficaz del IGSM, y el modelo se ejecuta cientos de veces en cada estudio. En cada ejecución se varían ligeramente los parámetros de entrada, seleccionados de manera que todas las ejecuciones tienen prácticamente la misma probabilidad de ser correctas si nos basamos en las observaciones actuales y en nuestros conocimientos. De este modo se consigue una evaluación más realista del rango de potenciales efectos futuros.

Poniendo en práctica este enfoque, analizamos, por ejemplo, las temperaturas y encontramos que el planeta podría calentarse desde 3,5 °C hasta 6,7 °C hacia

## Los ecosistemas terrestres y el marco del sistema terrestre global



## Las ruletas del riesgo de efecto invernadero



el fin de siglo<sup>5</sup>. Para ilustrar la incertidumbre en la temperatura, hemos desarrollado unas ruletas del tipo ruleta conocidas como "ruletas del riesgo de efecto invernadero". La superficie de cada rueda se divide en sectores de colores, cuyo tamaño representa la probabilidad estimada del cambio de temperatura de ese rango para el año 2100. Una rueda representa el resultado de no restringir las emisiones ("sin políticas"), mientras la otra muestra el resultado "con políticas".

Al realizar estos análisis, podemos ayudar a las instancias decisorias a comparar el valor de las diversas políticas de mitigación, las tecnologías energéticas y las estrategias de adaptación para reducir los riesgos del calentamiento global. Asimismo, podemos evaluar los costes de la estabilización de los gases de efecto invernadero a distintos niveles, y cómo se pueden justificar dichos costes con los beneficios que se pueden esperar de la eliminación de los daños.

Observando los distintos escenarios de control de emisiones, por ejemplo, hemos encontrado que incluso medidas de control relativamente modestas pueden tener un gran impacto en la reducción de probabilidades de que el calentamiento alcance niveles extremos. Si redujéramos ahora mismo las emisiones globales, habría una probabilidad aproximada del 50 % de estabilizar el clima a un nivel solo unas décimas por encima del objetivo de 2 °C: un nivel que probablemente sea un punto de inflexión, por encima del cual surgirían efectos del calentamiento climático potencialmente graves<sup>6</sup>.

Incluso una vez realizado este análisis, siempre hay un nivel de "profunda incertidumbre", que describe las relaciones físicas en el sistema Tierra actualmente desconocidas. No podemos predecir con precisión ciertos fenómenos debido a que el medio ambiente global comporta procesos interrelacionados complejos y dinámicos que no son comprendidos en su totalidad, muchos de los cuales contienen elementos caóticos que limitan fundamentalmente la previsibilidad del sistema climático. Incluso al observar las relaciones que eran de esperar y las que estamos midiendo, nos hemos encontrado algunas sorpresas tales como la fusión del hielo ártico a mayor velocidad que la predicha por cualquiera de los modelos. Junto a otros desafíos en este campo, nos enfrentamos al hecho de que un clima cambiante puede conllevar costes significativos que pueden no ser evidentes hasta después de que seamos testigos de ellos<sup>7</sup>.

### Cómo incorporar una escala regional

Todo lo expuesto anteriormente pone de manifiesto la utilidad del modelo a escala mundial. Pero, según va creciendo la amenaza del cambio climático, aumenta al mismo tiempo la importancia de evaluar los impactos regionales. Tal y como se planteaba al comienzo de este artículo, los dirigentes locales dependen de estos análisis para orientarse a la hora de adoptar decisiones críticas.

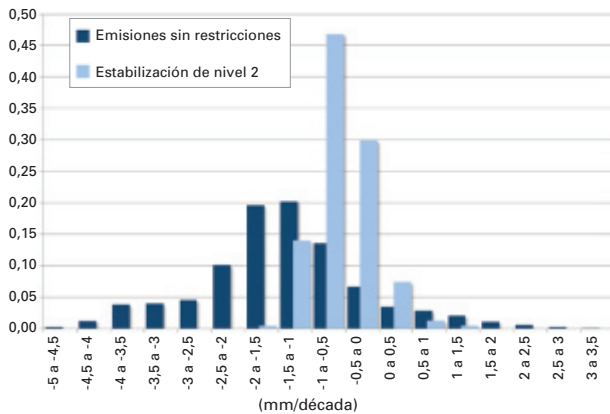
Comprendiendo la importancia creciente que tiene determinar la probabilidad de los efectos del cambio climático regional, el MIT ha creado un enfoque "híbrido" que amplía el alcance y la flexibilidad del análisis. Mediante la recopilación de patrones emergentes de

<sup>5</sup> Joint Program on the Science and Policy of Global Change [Programa conjunto de ciencias y políticas de cambio global], 2012: 2012 Energy and Climate Outlook, MIT JPSPGC Special Report, March, 13 p.

<sup>6</sup> Webster, M., A. P. Sokolov, J. M. Reilly, C. E. Forest, S. Paltsev, A. Schlosser, C. Wang, D. Kicklighter, M. Sarofim, J. Melillo, R. G. Prinn y H. D. Jacoby, 2012: Analysis of climate policy targets under uncertainty. *Climate Change*, 112(3-4): 569-583.

<sup>7</sup> Reilly, J. M., S. Paltsev, K. Strzepek, N. E. Selin, Y. Cai, K.-M. Nam, E. Monier, S. Dutkiewicz, J. Scott, M. Webster y A. Sokolov, 2012: Valuing Climate Impacts in Integrated Assessment Models: The MIT IGSM. *Climate Change*, en imprenta.

**Distribuciones de frecuencia híbridas del cambio climático regional**  
Cuenca del río Zambeze: primavera de la década de 2050



cambio climático procedentes de la comunidad de proyecciones de modelos climáticos analizados en el Proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP) junto con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), el MIT los ha combinado con el IGSM para elaborar distribuciones de frecuencia híbridas (HFD) con las que se puede cuantificar la probabilidad de resultados regionales concretos. Para determinar los patrones climáticos imperantes que alteran las emisiones de origen humano, caracterizamos las respuestas espaciales de cada modelo climático, en relación con su promedio zonal, a partir de incrementos transitorios de concentraciones de gases traza, y luego normalizamos estas respuestas contrastándolas con las correspondientes respuestas transitorias de la temperatura mundial. Este procedimiento permite la construcción de metaconjuntos de resultados climáticos regionales, a base de combinar estos patrones con los citados conjuntos de resultados climáticos zonales del IGSM obtenidos por el MIT —los cuales generan a su vez previsiones climáticas, con incertidumbre, en diferentes escenarios mundiales de actuación sobre el clima— con patrones resueltos regionalmente. Esta hibridación de las proyecciones longitudinales del modelo climático con los patrones globales y latitudinales pronosticados por el IGSM puede, en principio, aplicarse a cualquier estado dado o variable de flujo que cuente con la suficiente información tanto a nivel de observación como de modelización (a partir de los archivos del CMIP). Este enfoque liga coherentemente los datos socioeconómicos de diferentes escenarios de emisiones y varios niveles de incertidumbre en la respuesta mundial y regional del sistema Tierra.

En nuestro estudio inicial usando este enfoque descubrimos que a mediados de este siglo, cuando algunas regiones resultarán más afectadas que otras por las medidas de reducción de emisiones, si comparamos un escenario sin acciones con otro de estabilización de los gases de efecto invernadero, la reducción de emisiones reduciría las probabilidades de calentamiento regional. De hecho, el resultado más extremo de calentamiento incluido en el escenario sin acciones queda eliminado completamente. Al mismo tiempo, las probabilidades de cambios en la precipitación

regional hacia mediados de siglo se ven tanto crecer como decrecer. Sin embargo, cuando se reducen las concentraciones de gases de efecto invernadero en el escenario de estabilización, las mayores probabilidades de cambio en la precipitación regional apuntan hacia valores más benignos antes del fin de siglo. La estabilización reduce asimismo las posibilidades de cambios más extremos en la precipitación<sup>8</sup>.

Estas distribuciones de los resultados climáticos regionales se han aplicado específicamente a hacer evaluaciones del riesgo climático para países en vías de desarrollo, y muy recientemente se han centrado en la cuenca del río Zambeze. En este estudio consideramos las probabilidades (es decir, la distribución) de los cambios que se podrían esperar en importantes variables hidroclimáticas —precipitación (mostrada en la figura) y temperatura del aire en superficie— en condiciones de emisiones sin restricción y de crecimiento económico mundial, así como en un escenario de modesta estabilización (la estabilización de nivel 2 llega hasta una concentración equivalente de 660 ppm de CO<sub>2</sub> para el año 2100). Los cambios en estas cantidades durante la primavera y el verano tienen efectos notables sobre la productividad agrícola así como sobre las infraestructuras del transporte (es decir, carreteras, puentes, etc.). El resultado “más probable” para emisiones sin restricción (dado por la moda de la distribución) conduciría a una situación (no mostrada) seca y más cálida, con una pequeña probabilidad (en torno al 10 %) de unas condiciones al menos el doble de secas que las del resultado más probable. Sin embargo, hay también una pequeña posibilidad de que se den condiciones muy húmedas, que son las que presentan el mayor riesgo de daños en las infraestructuras del transporte. En el caso de la estabilización, la ocurrencia de estos resultados extremos desaparece de las distribuciones y el resultado más probable (casi el 50 % de la distribución, más del doble de probable que en el supuesto sin restricciones) cae ahora a la mitad de la sequedad (es decir, la reducción en la precipitación) observada en el caso sin restricciones.

Este enfoque híbrido supone una forma inmediata de aplicar al completo las capacidades del IGSM —esto es, un análisis de probabilidades de los sistemas integrados natural y humano— a escala regional. En conjunto, este enfoque puede ayudar a los responsables y a los políticos a tomar decisiones a largo plazo que tendrán impacto en el rumbo futuro de la planificación en sus países. Mientras que el método híbrido proporciona un progreso imprescindible en la previsión de impactos regionales del cambio climático, las mejoras del IGSM que el MIT lleva a cabo actualmente van a incluir una modelización más explícita de esas características regionales. Esperamos que tal complejidad añadida se nutra de las capacidades presentes para avanzar en la dirección de unas evaluaciones regionales bien afinadas.

<sup>8</sup> Schlosser, C. A., X. Gao, K. Strzepek, A. Sokolov, C. E. Forest, S. Awadalla, W. Farmer, 2012: Quantifyinf the Likelihood of Regional Climate Change: A Hybridized Approach. *J. Climate*, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00730.1.