

Proyecciones climáticas en la próxima fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados

por John Dunne¹, Helene Hewitt², Susann Tegtmeier³, Cath Senior², Tatiana Ilyina⁴, Baylor Fox-Kemper⁵ y Eleanor O'Rourke⁶

Urge contar con grandes conjuntos de modelos climáticos, de alta resolución y precisión, a medida que los países realizan esfuerzos locales de mitigación y adaptación al cambio climático para alcanzar la eficiencia energética y la transición de recursos. El Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP), puesto en marcha por primera vez por el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (WCRP) en 1995, es muy prometedor para lograrlos en su séptima fase (CMIP7). El CMIP6, que está llegando a su fin, ha conseguido muchos avances, especialmente con los modelos del sistema Tierra, pero muchas cuestiones científicas siguen sin respuesta. El CMIP7 se esforzará por abordarlas y por encontrar respuestas a las nuevas preguntas que han surgido, al tiempo que se centrará en la prestación de servicios climáticos que sirvan de base para la toma de decisiones locales en materia de mitigación y adaptación.

Las proyecciones de cambio climático dependen de los modelos acoplados atmósfera-océano para producir simulaciones del clima futuro que sean coherentes con la física subyacente. Dichos modelos se inician a partir de modelos o de observaciones del estado actual del clima y se basan en escenarios de forzamiento externo, como los forzamientos solar y volcánico, las emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles, y los cambios en el uso del suelo. El PMIC encabezó las iniciativas mediante la creación del CMIP (Meehl, 2023). Las incertidumbres estructurales, de escenarios y de variabilidad interna conducen a una serie de resultados posibles para el clima futuro (Hawkins y Sutton, 2009). El CMIP ha permitido caracterizar y comprender las incertidumbres en las proyecciones futuras de diferentes centros de modelización. Los resultados del CMIP han resultado esenciales para los informes de evaluación de los cambios climáticos pasados y posibles en el futuro que han

sido elaborados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). A lo largo de los años, las proyecciones del CMIP a escala regional se han vuelto cada vez más importantes para las instancias normativas, y el [Experimento coordinado sobre reducción de escala de modelos climáticos regionales](#) (CORDEX), estrechamente relacionado con el PMIC, proporciona un nivel de detalle aún mayor, necesario para la toma de decisiones.

Evolución de los modelos climáticos y del sistema Tierra

El principal objetivo del CMIP es comprender mejor el clima pasado, presente y futuro, apoyando así las líneas prioritarias de investigación del PMIC. Los primeros modelos acoplados atmósfera-océano incluían solo "océanos pantanosos" y mantenían fijas la criosfera y la biosfera (Manabe y Stouffer, 1980). Las siguientes generaciones de modelos representaban los balances de masa, momento y energía del sistema Tierra a través de una combinación de las ecuaciones dinámicas del movimiento de la atmósfera y el océano, los procesos físicos no resueltos y la termodinámica de las interacciones entre la radiación, las nubes, los aerosoles, la criosfera, los ecosistemas y los sistemas humanos.

La necesidad cada vez más acuciante de la sociedad de disponer de información detallada sobre el cambio climático ha impulsado mejoras sustanciales en la modelización del sistema Tierra en cuanto a la resolución (desde decenas de grados hasta un cuarto de grado en la actualidad) y a la comprensión. Los modelos del sistema Tierra actuales incluyen la representación del clima físico, los ciclos interactivos del carbono, la química, los aerosoles, la biogeoquímica, los ecosistemas y los factores humanos. También

- 1 Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA), División de Investigación Oceánica y Atmosférica (OAR), [Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos](#) (GFDL), Estados Unidos de América
- 2 [Met Office](#), Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte
- 3 [Instituto de Estudios Espaciales y Atmosféricos](#), Universidad de Saskatchewan (Canadá)
- 4 [Centro para la Investigación del Sistema Tierra y la Sostenibilidad](#) (CEN), Universidad de Hamburgo; [Helmholtz-Zentrum Hereon](#); e [Instituto Max Planck de Meteorología](#)
- 5 [Departamento de Ciencias de la Tierra, Medioambientales y Planetarias](#) (DEEPS), Universidad de Brown
- 6 Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (WCRP), [Oficina Internacional del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados](#) (CMIP), Centro Europeo para Aplicaciones Espaciales y Telecomunicaciones (ECSSAT), Harwell Science & Innovation Campus, Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte

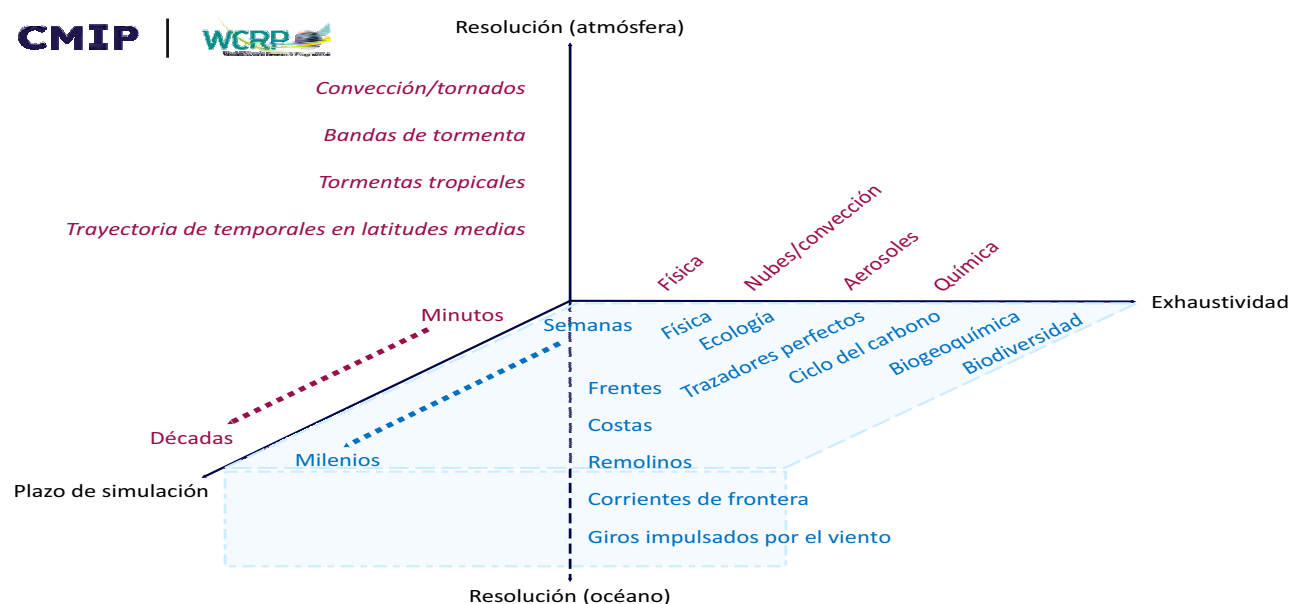


Figura 1. La modelización del sistema Tierra se optimiza en términos de resolución, exhaustividad y plazo de simulación. Los aspectos atmosféricos se muestran en rojo y los aspectos oceánicos en azul. Hay que tener en cuenta que conjuntos, experimentos y escenarios, precisión, exactitud, disponibilidad y familiaridad también entran en juego en la búsqueda de eficiencia y robustez.

proporcionan una granularidad mejorada a través de conjuntos de modelos que permiten evaluar la incertidumbre estructural, la detección y atribución, la predictibilidad y los extremos (figura 1). A medida que la urgencia del cambio climático ha ido aumentando a lo largo de las décadas, también lo ha hecho la exhaustividad de estos esfuerzos en paralelo con las mejoras de los modelos (Meehl, 2023).

Historia de las proyecciones climáticas

Las proyecciones de cambio climático a partir de modelos del clima se basaron al principio en duplicar de forma teórica la cantidad de dióxido de carbono (CO_2) (Meehl, 2023). Los científicos pudieron utilizar estos experimentos para estimar la sensibilidad climática en equilibrio (Manabe y Stouffer, 1980). Pronto se añadieron experimentos en los que el CO_2 aumentaba un 1% anual para estimar la respuesta climática transitoria (Mitchell y otros, 1990). Este era el estado de la ciencia en las fases primera y segunda del CMIP. A estas simulaciones idealizadas le siguieron conjuntos de escenarios históricos y proyectados más realistas, como parte del Informe especial sobre escenarios de emisiones (1992) utilizado en el CMIP3 (Meehl y otros, 2004), sobre trayectorias de concentración representativas (RCP) en el CMIP5 (Taylor y otros, 2012) y sobre trayectorias socioeconómicas compartidas (O'Neill y otros, 2016) en el CMIP6 (Eyring y otros, 2016). En cada caso, las proyecciones incluían una variedad de escenarios, desde emisiones muy altas hasta muy bajas, con la intención de capturar al máximo la incertidumbre previsible. En el Sexto Informe de Evaluación del IPCC (AR6; Lee y otros, 2021), los resultados del CMIP6 proporcionaron proyecciones del clima, que incluían cambios en parámetros clave en varios ámbitos del sistema Tierra.

El legado del CMIP6

Para facilitar que la aplicación de los modelos climáticos en el experimento de intercomparación de múltiples modelos sea útil y eficiente, el CMIP se basa en una infraestructura distribuida y federada, y en unos estándares comunitarios, para proporcionar datos de modelos de los experimentos coordinados. El CMIP6 coordinó 24 intercomparaciones científicas individuales multimodelos para mejorar la comprensión del proceso, evaluar la respuesta al forzamiento y conocer los sesgos sistemáticos, la variabilidad y la predictibilidad, de acuerdo con los [Grandes retos científicos del WCRP](#) (Eyring y otros, 2016). En este contexto, se proporcionaron más de 25 petabytes de datos, que se alojaron en más de 30 nodos de datos en todo el mundo.

Las proyecciones del CMIP6 han hecho avanzar el conocimiento científico en varios ámbitos. Destacan la descripción general de las respuestas climáticas en varios escenarios de mitigación (Tebaldi y otros, 2020), la reducción de la incertidumbre tanto en el forzamiento radiativo efectivo (Smith y otros, 2020) como en la respuesta climática con nuevas restricciones, al relacionar la dispersión entre modelos y observaciones (Brient, 2020) con un conjunto mejorado de modelos (p. ej. Notz y otros, 2020; Roach y otros, 2020). El CMIP6 ha proporcionado una clara separación de la incertidumbre derivada de la estructura del modelo, del escenario y de la variabilidad interna (Lehner y otros, 2020), ha mejorado la cuantificación de los factores que controlan la disponibilidad de agua en la tierra a través de la evaporación y los cambios monzónicos (por ejemplo, Wang y otros, 2020), y ha caracterizado los riesgos de extremos climáticos en la temperatura y la precipitación (Kim y otros, 2020). Los modelos del sistema Tierra totalmente acoplados de carbono-clima han caracterizado la respuesta transitoria a las emisiones acumulativas (Arora y otros, 2020), mientras

que los modelos químicos interactivos permitieron caracterizar los factores climáticos de corta duración tanto en el clima como en la contaminación del aire (Allen y otros, 2020, Turnock y otros, 2020). Se han utilizado modelos que representan ciclones tropicales para estimar tendencias futuras (Roberts y otros, 2020). Un indicador de la influencia del CMIP6 es el número de citas: durante los últimos siete años ha habido más de 7 500 citas del documento general del CMIP6 (Eyring y otros, 2016) y de la descripción del [Proyecto de intercomparación de modelos de escenarios](#) (Scenario-MIP) (O'Neill y otros, 2016).

A lo largo de la historia del IPCC, las proyecciones de los modelos climáticos elaborados por el CMIP han prestado una amplia gama de servicios a las comunidades que se ocupan de los impactos, la mitigación y la adaptación. A medida que ha aumentado la utilidad de los modelos, las aplicaciones de las ciencias físicas y sus impactos se han incrementado exponencialmente (véase el artículo de este número del *Boletín* titulado "Servicios climáticos basados en predicciones y proyecciones climáticas"). Puesto que los modelos climáticos en la actualidad son capaces de representar las condiciones cambiantes a escala continental e inferior, no han tardado en llevarse a cabo esfuerzos de reducción de escala regional para aplicar esta información a nivel nacional y así apoyar la planificación nacional sobre la vulnerabilidad y la adaptación a través de iniciativas como el Proyecto de Intercomparación de Modelos de Impacto Intersectorial (Warszawski y otros, 2014), la Junta Asesora sobre Vulnerabilidad, Impactos, Adaptación y Servicios Climáticos (Ruane y otros, 2016), el Experimento coordinado sobre reducción de escala de modelos climáticos regionales

(CORDEX; Giorgi y Gutowski, 2015) y las evaluaciones nacionales. Por ejemplo, el [Atlas Interactivo](#) del Sexto Informe de Evaluación (AR6) del IPCC pretende facilitar estos esfuerzos, basándose en el CMIP6 y en datos de observación en todo el mundo. Estas diversas comunidades se han convertido en asociados fundamentales del CMIP tanto en el desarrollo conjunto de las prioridades de diagnóstico necesarias para los análisis de impacto, como en la identificación iterativa de los sesgos de los modelos que limitan estas aplicaciones. A medida que los países realizan esfuerzos de mitigación y adaptación, como la eficiencia energética y la transición de fuentes, cada vez es más necesario contar con conjuntos más grandes con precisión de alta resolución para permitir un mayor detalle en la detección y atribución, y así satisfacer las necesidades de una manera más localizada y sectorial de lo que antes era posible.

¿Cuál es la dirección científica del CMIP7?

Tras el CMIP6, siguen pendientes varias cuestiones científicas y han surgido otras nuevas que deberá abordar la siguiente fase (CMIP7). Entre ellas se encuentran las cuestiones sobre el rango de variación de la sensibilidad climática, que se ha vuelto más incierto en el conjunto de modelos del CMIP6, a pesar de que los forzamientos y las limitaciones observacionales se han vuelto más precisos (Meehl y otros, 2020; figura 2). El AR6 también destacó la gran incertidumbre existente en las proyecciones de aumento del nivel del mar (Kopp y otros, 2023). Una mejor caracterización de las emisiones regionales de aerosoles y su variabilidad es fundamental para realizar simulaciones realistas de las respuestas regionales de temperatura,

Sensibilidad climática en equilibrio (ECS) y respuesta climática transitoria (TCR)

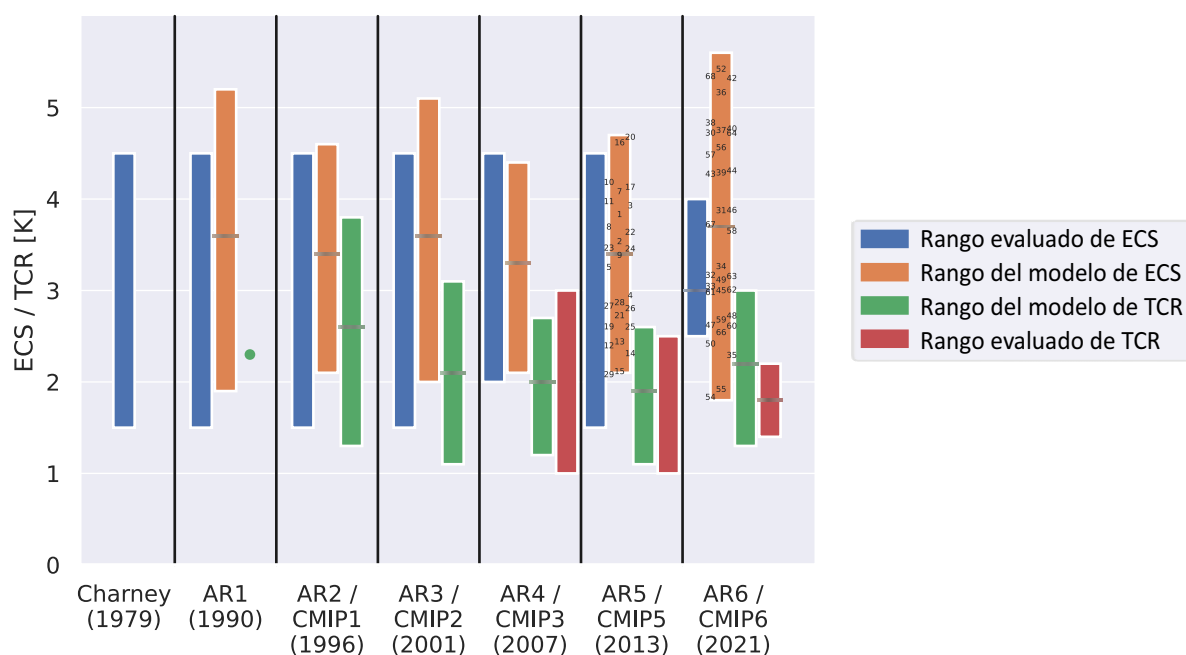


Figura 2. Valores históricos de sensibilidad climática en equilibrio (en la figura, ECS) y respuesta climática transitoria (en la figura, TCR) de Meehl y otros (2020) en comparación con el "rango probable" de ECS del AR6 del IPCC de 2,5 a 4,0 K (azul) y el "rango probable" de TCR de 1,4 a 2,2 (rojo) (modificado por Manuel Schlund).

precipitación y calidad del aire, que se complican aún más si se consideran los efectos del polvo, los incendios y la sal marina. A más largo plazo, existe una amplia gama de posibles puntos de inflexión climáticos, entre ellos la gran incertidumbre en las reacciones del CO₂ y CH₄ (metano) con los suelos, en particular la acción microbiana en los humedales y el permafrost (Sociedad Estadounidense de Microbiología, 2023), lo que limita la certidumbre sobre la cantidad restante de carbono y la estabilidad climática. La cuestión de la eficacia de la mitigación climática y de las consecuencias imprevistas se ha vuelto cada vez más apremiante y requiere una experimentación con modelos específicos. También sigue siendo necesario comprender mejor cómo cambiarán en el futuro los extremos y la cartografía de los modos de variabilidad, como El Niño-Oscilación del Sur.

Mientras que los primeros modelos climáticos se basaban en forzamientos debidos a las concentraciones de gases de efecto invernadero y dependían de los modelos integrados de evaluación para convertir las emisiones en concentraciones, en la actualidad varios centros de modelización disponen de modelos del sistema Tierra capaces de simular internamente ciclos de carbono y forzamientos coherentes, directamente a partir de las emisiones de CO₂ (por ejemplo, figura 3). Esta capacidad permite una evaluación sistemática de las incertidumbres del ciclo del carbono y de las retroalimentaciones carbono-clima, fundamentales para estimar las cantidades de carbono remanentes para informar del proceso de balance a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y para evaluar las implicaciones de las interacciones entre el ciclo del carbono y el clima en el contexto de “exceso” y la eliminación del CO₂ necesaria para revertir el calentamiento climático. Estos modelos del sistema Tierra también ofrecen la oportunidad de explorar las implicaciones de trayectorias alternativas para la evolución a largo plazo del sistema acoplado carbono-clima.

El CMIP7 tendrá que encontrar el equilibrio adecuado entre complejidad, resolución y tamaño del conjunto (figura 1). La inclusión de procesos complejos permitirá que se produzcan todas las interacciones posibles, el aumento de la resolución de los modelos proporcionará detalles regionales de las proyecciones y los conjuntos grandes ayudarán a detectar señales sólidas en las proyecciones. Los centros de modelización, que disponen de determinados recursos informáticos de alto rendimiento, priorizan el uso eficiente respecto al tamaño de la resolución, la complejidad, el plazo de simulación y el archivo de los diagnósticos, para optimizar esos recursos. Las optimizaciones son diferentes en los distintos centros de modelización, debido al objetivo y por el ajuste al propósito de los propios modelos, ya que los del sistema Tierra tienen muchas aplicaciones posibles para los ecosistemas, la calidad del aire y del agua y otros impactos más allá del clima físico. Los centros desarrollan modelos que son aplicables a temas de investigación en escalas de tiempo climáticas,

es decir, modelos que calculan al día al menos un año de simulación, y a menudo decenas de años. Incluso dentro de los objetivos del CMIP centrados en las proyecciones climáticas futuras, las diferentes tomas de decisión conducen a una amplia diversidad en los modelos ya que sus propósitos varían desde el impacto de tormentas extremas (alta resolución atmosférica horizontal) hasta la dinámica estratosférica y el ozono (alta resolución atmosférica vertical e interacciones químicas).

El CMIP intenta abordar estas limitaciones y tratar la incertidumbre de los modelos facilitando la normalización y la coordinación entre la ciencia climática y los servicios que requieren un acoplamiento entre los componentes del sistema Tierra. Uno de los requisitos del CMIP más exigentes en cuanto al suministro de datos proviene de las unidades de reducción de escala regional dinámica, como el CORDEX. Las necesidades de suministro de datos aumentarán con la nueva clase de modelos globales a escala kilométrica que entrarán en funcionamiento (véase el artículo de este número del *Boletín* titulado “Modelización del sistema Tierra a escala kilométrica: nuevo paradigma para la predicción climática”). El CMIP necesitará trazar un camino que permita asumir la nueva información a escalas espaciales más pequeñas y temporales mayores desde las capacidades actuales. Otra ampliación reciente del objetivo son las aplicaciones a la predicción y predictibilidad decenal, a través del [Proyecto de Predicción Decenal del Clima](#). El objetivo central del CMIP es el de facilitar de manera efectiva y eficiente estas y otras actividades científicas prioritarias del PMIC.

Desarrollo de escenarios futuros

El Grupo de Trabajo III del AR6 del IPCC (Riahi y otros, 2022; figura 3) realizó avances considerables en un marco de consenso para la evaluación de escenarios futuros, entre ellos la definición de una referencia de la “política aplicada” de 2021 (también conocida como “política actual”) y su relación con las nuevas trayectorias de mitigación propuestas. Sobre la base de este enfoque de próxima generación para las proyecciones, la comunidad ScenariMIP se reunió en Reading (Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte), en junio, para definir las prioridades y los cronogramas para la generación de un conjunto actualizado de escenarios futuros armonizados con el forzamiento histórico actualizado. Entre las prioridades para este conjunto, descritas en el [informe de su seminario](#), figuran: la continuidad con los escenarios de mitigación climática SSP1-2.6 del CMIP6 y de adaptación climática y tratamiento de errores SSP3-7.0 utilizados por CORDEX, alineándose con la “política aplicada” del Grupo de Trabajo III del AR6 (Riahi y otros, 2022), y la expresión de escenarios coherentes con la aspiración de París 2015 de mantener el calentamiento dentro de 1,5 °C del nivel preindustrial dentro de limitaciones de viabilidad. La comunidad está llevando a cabo presentaciones y debates junto con la creación de varios equipos de trabajo.

Las emisiones globales de GEI según las CDN anunciadas antes de la CP26 harían *probable* que el calentamiento supere los 1,5 °C y también harían más difícil después de 2030 limitar el calentamiento a menos de 2 °C.

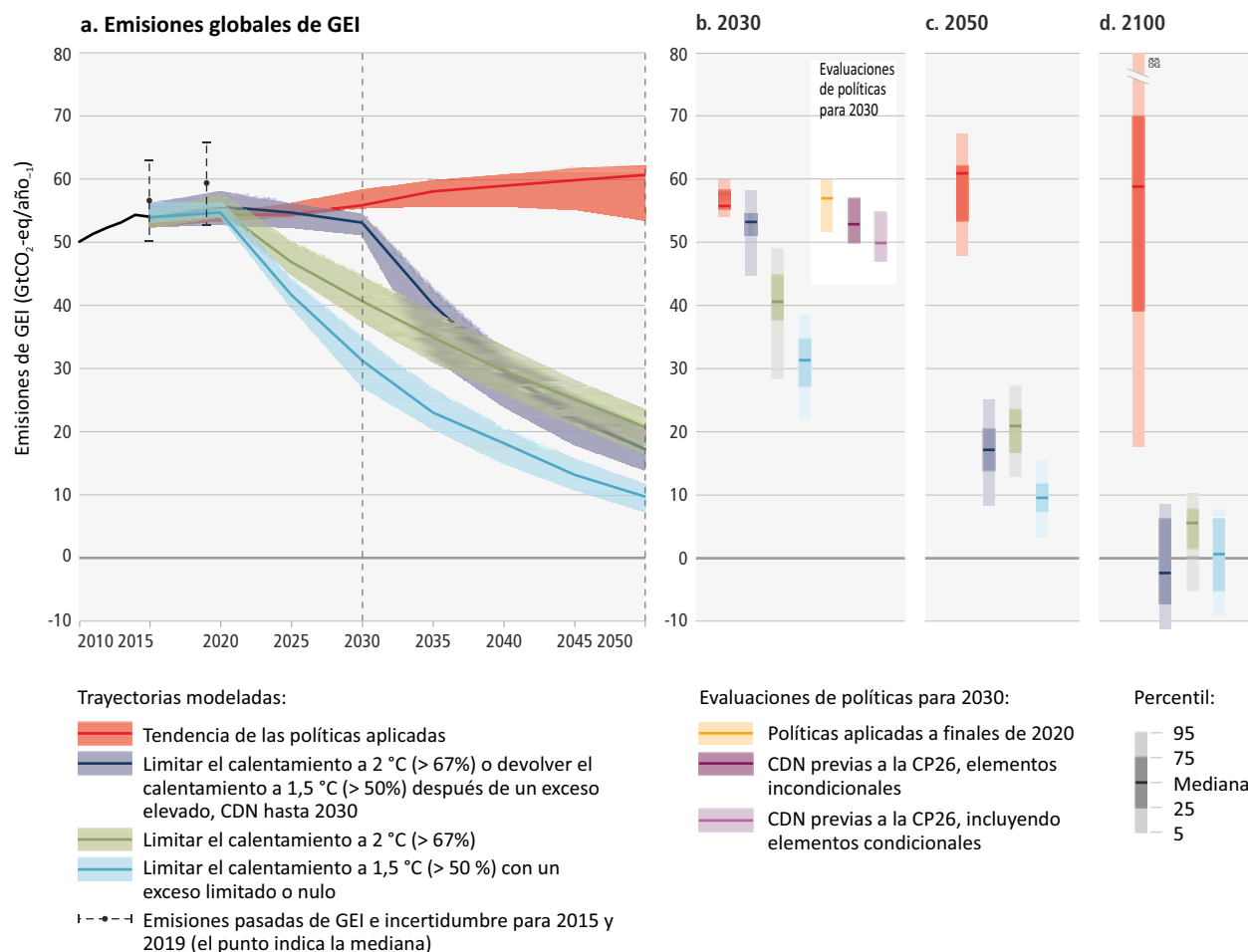


Figura 3. Proyecciones de emisiones futuras de gases de efecto invernadero (GEI) según las contribuciones determinadas a nivel nacional (CDN) y los esfuerzos de mitigación destinados a limitar el calentamiento a los objetivos de 2 °C y 1,5 °C por encima de los valores preindustriales del Acuerdo de París de 2015, extraídas de la Síntesis para responsables de políticas del Grupo de Trabajo III del AR6 del IPCC (figura SPM.4 en IPCC, 2021: Resumen para responsables de políticas).

Visión del futuro del CMIP

Uno de los principales objetivos del CMIP6 era disponer de un proyecto de intercomparación de modelos en funcionamiento (Eyring y otros, 2016) para respaldar el avance científico general más allá de las limitaciones de plazos y entregas del proceso de evaluación del IPCC, que solo se cumplió parcialmente. De cara al futuro, el Grupo de expertos del CMIP trata de encontrar formas de realizar más plenamente esta visión combinada de ciencia y servicio. A través de la recién creada [Oficina internacional de proyectos](#), alojada en la Agencia Espacial Europea, el CMIP está colaborando activamente con los miembros interesados de la comunidad científica, entre ellos centros de modelización, proveedores de infraestructuras, proyectos de intercomparación de modelos, investigadores, profesionales, gestores de programas, el IPCC y otros interesados.

Para ayudar a los centros de modelización a gestionar los recursos para contribuir al séptimo ciclo de evaluación del

IPCC, el Grupo de expertos del CMIP ha propuesto identificar un conjunto armonizado de experimentos y diagnósticos de interés prioritario previsto para el análisis. El CMIP también está adoptando un enfoque más continuo de las contribuciones de los proyectos de intercomparación de modelos con plazos independientes de diseño experimental. Las aplicaciones científicas en curso contarán con la ayuda de un grupo de trabajo del CMIP sobre forzamientos que pretende actualizar periódicamente los forzamientos históricos para facilitar una comparación más directa de las simulaciones de los modelos atmosféricos y acoplados con los datos históricos recientes.

Para mejorar y diversificar el compromiso de la comunidad, el CMIP ha creado una iniciativa denominada "El CMIP bajo una nueva perspectiva" con el fin de incorporar los conocimientos de los investigadores y profesionales que inician su carrera. Por último, el CMIP solo puede seguir desempeñando su función de investigación y servicio mediante una distribución sólida de los datos de los modelos. Se

están realizando esfuerzos para asegurar estos recursos y aprovechar la infraestructura informática y de distribución más avanzada para minimizar los obstáculos que impiden el uso eficiente y eficaz de los datos del CMIP. En resumen, el CMIP sigue evolucionando como una iniciativa de la comunidad internacional para apoyar tanto los aspectos científicos como de servicio de la modelización acoplada.

Para obtener más información acerca del CMIP y del desarrollo del CMIP7, véase <https://wcrp-cmip.org/>.

Referencias

- Allen, R. J., Turnock, S., Nabat, P., Neubauer, D., Lohmann, U., Olivie, D., ... y Collins, W. J. (2020). Climate and air quality impacts due to mitigation of non-methane near-term climate forcers. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(16), 9641-9663.
- American Society for Microbiology (2023). Microbes in Models: Integrating Microbes into Earth System Models for Understanding Climate Change: Report on an American Academy of Microbiology Virtual Colloquium held on Dec. 6 and 8, 2022. Washington (DC).
- Arora, V. K., Katavouta, A., Williams, R. G., Jones, C. D., Brovkin, V., Friedlingstein, P., ... y Ziehn, T. (2020). Carbon-concentration and carbon-climate feedbacks in CMIP6 models and their comparison to CMIP5 models. *Biogeosciences*, 17(16), 4173-4222.
- Brient, F. (2020). Reducing uncertainties in climate projections with emergent constraints: concepts, examples and prospects. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37, 1-15.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J. y Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958.
- Giorgi, F. y Gutowski Jr, W. J. (2015). Regional dynamical downscaling and the CORDEX initiative. *Annual review of environment and resources*, 40, 467-490.
- Hawkins, E. y Sutton, R. (2009). The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(8), 1095-1108.
- Kim, Y. H., Min, S. K., Zhang, X., Sillmann, J. y Sandstad, M. (2020). Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble for climate extreme indices. *Weather and Climate Extremes*, 29, 100269.
- Kopp, R. E., Oppenheimer, M., O'Reilly, J. L. y otros (2023). Communicating future sea-level rise uncertainty and ambiguity to assessment users. *Nat. Clim. Chang.*, 13, 648-660, <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01691-8>.
- Lee, J.-Y., Marotzke, J., Bala, G., Cao, L., Corti, S., Dunne, J. P., Engelbrecht, F., Fischer, E., Fyfe, J. C., Jones, C., Maycock, A., Mutemi, J., Ndiaye, O., Panickal, S. y Zhou, T. (2021). Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information. En: Cambio climático 2021. Bases físicas. Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu y B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, Estados Unidos de América, pp. 553-672, <https://doi.org/10.1017/9781009157896.006>.
- Figura SPM.4. En: IPCC (2021). Resumen para responsables de políticas. En: Cambio climático 2021. Bases físicas. Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu y B. Zhou (eds.)]. Cambridge, Reino Unido y Nueva York, Estados Unidos de América, pp. 3-32, <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>.
- Lehner, F., Deser, C., Maher, N., Marotzke, J., Fischer, E. M., Brunner, L., ... y Hawkins, E. (2020). Partitioning climate projection uncertainty with multiple large ensembles and CMIP5/6. *Earth System Dynamics*, 11(2), 491-508.
- Manabe, S. y Stouffer, R. J. (1980). Sensitivity of a global climate model to an increase of CO₂ concentration in the atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 85(C10), 5529-5554.
- Meehl, G. A., Covey, C., Latif, M., McAvaney, B., Mitchell, J. F. B. y Stouffer, R. (2004). Soliciting participation in climate model analyses leading to IPCC Fourth Assessment Report. *Eos, Trans. Amer. Geophys. Union*, 85, 274.
- Meehl, G. A., Senior, C. A., Eyring, V., Flato, G., Lamarque, J. F., Stouffer, R. J., ... y Schlund, M. (2020). Context for interpreting equilibrium climate sensitivity and transient climate response from the CMIP6 Earth system models. *Science Advances*, 6(26), eaba1981.
- Meehl, G. A. (2023). The Role of the IPCC in Climate Science. En: Oxford Research Encyclopedia of Climate Science.
- Mitchell, J. F. B., Manabe, S., Meleshko, V. y Tokioka, T. (1990). Equilibrium climate change and its implications for the future. En: Cambio climático. La evaluación científica del IPCC. J. T. Houghton, G. J. Jenkins, J. J. Ephraums, Eds. (Cambridge Univ. Press, Cambridge, Reino Unido).
- Notz, D. y Community, S. I. M. I. P. (2020). Arctic sea ice in CMIP6. *Geophysical Research Letters*, 47(10), e2019GL086749.

- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... y Sanderson, B. M. (2016). The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461-3482.
- Riahi, K., Schaeffer, R., Arango, J., Calvin, K., Guivarch, C., Hasegawa, T., Jiang, K., Kriegler, E., Matthews, R., Peters, G. P., Rao, A., Robertson, S., Sebbit, A. M., Steinberger, J., Tavoni, M. y van Vuuren, D. P. (2022). Mitigation pathways compatible with long-term goals. En: IPCC (2022). Cambio climático 2022. Mitigación del cambio climático. Contribución del Grupo de Trabajo III al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz y J. Malley (eds.)]. Cambridge, Reino Unido y Nueva York, Estados Unidos de América, <https://doi.org/10.1017/9781009157926.005>.
- Roach, L. A., Dörr, J., Holmes, C. R., Massonnet, F., Blockley, E. W., Notz, D., ... y Bitz, C. M. (2020). Antarctic sea ice area in CMIP6. *Geophysical Research Letters*, 47(9), e2019GL086729.
- Ruane, A. C., Teichmann, C., Arnell, N. W., Carter, T. R., Ebi, K. L., Frieler, K., ... y Vincent, K. (2016). The vulnerability, impacts, adaptation and climate services advisory board (VIACS AB v1.0) contribution to CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3493-3515.
- Smith, C. J., Kramer, R. J., Myhre, G., Alterskjær, K., Collins, W., Sima, A., ... y Forster, P. M. (2020). Effective radiative forcing and adjustments in CMIP6 models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(16), 9591-9618.
- Tebaldi, C., Debeire, K., Eyring, V., Fischer, E., Fyfe, J., Friedlingstein, P., ... y Ziehn, T. (2020). Climate model projections from the scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) of CMIP6. *Earth System Dynamics Discussions*, 2020, 1-50.
- Turnock, S. T., Allen, R. J., Andrews, M., Bauer, S. E., Deushi, M., Emmons, L., ... y Zhang, J. (2020). Historical and future changes in air pollutants from CMIP6 models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(23), 14547-14579.
- Wang, B., Jin, C. y Liu, J. (2020). Understanding future change of global monsoons projected by CMIP6 models. *Journal of Climate*, 33(15), 6471-6489.
- Warszawski, L., Frieler, K., Huber, V., Piontek, F., Serdeczny, O. y Schewe, J. (2014). The inter-sectoral impact model intercomparison project (ISI-MIP): project framework. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3228-3232.